

Санкт - Петербургский государственный университет

Лазуткина Елена Сергеевна

**Внутригодовая изменчивость характеристик внутреннего волнения вблизи
Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов
по данным спутниковой радиолокации**

Выпускная квалификационная работа магистра по направлению 05.04.04
«Гидрометеорология»

Основная образовательная программа: ВМ.5746.2019 «Физическая океанография и
биопродуктивность океанов и морей (ФОБОС)»

Научный руководитель

д. г.н., профессор каф. Океанологии

Зимин Алексей Вадимович

Рецензент

к.г.н., ведущий научный сотрудник
СПбФ ИО РАН

Романенков Дмитрий Анатольевич

Санкт – Петербург
2021

Оглавление

Список используемых сокращений.....	3
Введение.....	4
Глава 1. Особенности района исследования.....	7
1.1 Физико-географические особенности.....	7
1.2 Метеорологические характеристики.....	9
1.3 Гидрологические характеристики.....	12
1.4 Внутренние волны.....	19
Глава 2. Материалы и методы.....	21
2.1 Спутниковые методы наблюдения за внутренними волнами.....	21
2.2 Описание исходных данных и методов их обработки.....	26
Глава 3. Анализ полученных результатов.....	31
3.1 Пространственно - временная изменчивость проявлений КВВ в летний период.....	31
3.2 Пространственно - временная изменчивость проявлений КВВ в осенний период.....	37
3.3 Пространственно - временная изменчивость проявлений КВВ в весенний период.....	43
3.4 Пространственно - временная изменчивость проявлений КВВ в зимний период.....	49
3.5 Особенности проявлений КВВ на рассматриваемой акватории в целом за год.....	55
3.6 Обсуждение возможных механизмов генерации КВВ.....	61
Заключение.....	66
Список литературы.....	68

Список используемых сокращений

ВВ – внутренние волны

КВВ – короткопериодные внутренние волны

ВГВ – внутренние гравитационные волны

РЛИ – радиолокационные изображения

ИСЗ – искусственный спутник Земли

РЛС – радиолокационная станция

РСА – радиолокатор с синтезированной апертурой

РЛ - радиолокационный

ИК – инфракрасный

ВКС – верхний квазиоднородный слой

ГПС – глубина перемешанного слоя

СПбГУ – Санкт-Петербургский Государственный университет

СПбФ ИО РАН – Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.

Ширшова Российской академии наук;

Введение

Внутренние волны - это волны, наблюдаемые на поверхностях раздела плотности или в пределах слоев, где существуют вертикальные градиенты плотности. Они могут существовать в любой стратифицированной жидкости и могут быть вызваны потоком над неровной поверхностью дна, атмосферными возмущениями, приливными силами и сдвигом скоростей. Амплитуда внутренних волн существенна на всех горизонтах, за исключением дна, где она нулевая, и поверхности, где она крайне мала. На изменение амплитуды с глубиной влияет распределение плотности, причем для смещения нечетко выраженной границы раздела плотности требуется меньше энергии, чем для смещения четко выраженной границы. Из-за больших вертикальных и горизонтальных смещений частиц воды внутренние волны являются одним из важных факторов перемешивания и переноса водных масс. В отдельных районах океана высота внутренних волн может достигать сотен метров, это само по себе показывает необходимость изучения данного явления.

Однако, до настоящего времени большинство программ наблюдений в океане в основном нацелены на исследование особенностей режима крупномасштабной циркуляции и процессов синоптического масштаба, так как работа по выявлению процессов меньшего масштаба осложнена как их обнаружением, и так и нахождением связей с явлениями других масштабов.

Привлечение аэрокосмического радиолокационного зондирования морской поверхности к исследованию внутреннего волнения в океане значительно расширило возможности изучения процессов их генерации, распространения и расширило представление о географии и физике внутренних волн в океане. Наиболее эффективным инструментом для обнаружения ВВ их космоса, который сочетает в себе всепогодность и высокое пространственное разрешение, являются радиолокаторы с синтезированной апертурой. Наблюдения внутренних волн на радиолокационных снимках стало возможным с запуска ИСЗ Seasat в 1978 году. Модулируя ветровую рябь своими орбитальными течениями, внутренние волны проявляются на морской поверхности в виде сликов - полос выглаженной ряби (в зоне дивергенции) и в виде сулов - полос повышенной интенсивности ряби (в зоне конвергенции). Основная форма поверхностных проявлений внутренних волн на спутниковых изображениях - это чередование полос выглаженной и шероховатой морской поверхности. В океане и приливных морях основным механизмом генерации внутренних волн является взаимодействие приливных течений с неоднородностями дна или краем шельфа (Лаврова, 2018). Таким образом, появление во второй половине XX века спутниковых радиолокаторов с

синтезированной апертурой позволило обнаружить, что поверхностные проявления короткопериодных внутренних волн встречаются во многих районах Мирового океана.

Одной из областей постоянных проявлений внутренних волн на радиолокационных изображениях является российская часть шельфа Тихого океана у берегов Камчатки и Курильских островов (Епифанова и др., 2019; Jackson, Apel, 2004).

Обобщение данных спутниковых и контактных наблюдений (Сабинин, Серебряный, 2007) выявило, что вблизи океанского побережья Камчатского полуострова наблюдается сложная картина цугов короткопериодных внутренних волн, взаимодействующих друг с другом, а также с меандрами Камчатского течения. Также было установлено, что проявляющиеся с приливной периодичностью интенсивные внутренние волны высотой 10-15 м – типичное явление, как для шельфа полуострова, так и прилегающих участков материкового склона (Сабинин, Серебряный, 2007; Рао, 2002). Однако несмотря на значительный объем накопленной спутниковой информации отсутствуют обобщающие работы, дающие представление о пространственно-временном распределении характеристик КВВ в данном регионе.

Изучения картины распределения КВВ с учетом региональной специфики протяженного океанского шельфа не вызывает сомнения. Особый интерес представляет оценка интенсивности внутреннего волнения и выделение локальных районов его наиболее частых проявлений («горячих точек») в российской части шельфа Тихого океана у берегов Камчатки и Курильских островов. Так как высокая повторяемость внутреннего волнения на шельфах может вызывать проблемы и трудности подводного мореплавания и акустической связи (Родионов и др., 2012). Также внутренние волны могут воздействовать на гидротехнические сооружения, которые размещены на дне (Тюгини др. 2014; Fraser, 1999).

Целью работы является анализ пространственно-временной изменчивости характеристик поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн по данным спутниковых радиолокационных наблюдений вблизи Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов за декабрь 2018 – ноябрь 2019.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) Создать банк исходных данных (архив РЛИ изображений)
- 2) Снять характеристики (координаты центра гребня лидирующей волны, количество гребней в волновом пакете, средняя длина волны, длина лидирующего гребня, направление распространения) КВВ на РЛИ

3) Выполнить статистическую обработку полученных данных о характеристиках КВВ и их графическое представление. Построить карты и провести оценку встречаемости в течении года

4) Выделить районы большей встречаемости КВВ

5) Оценить связь встречаемости КВВ с процессами большего масштаба

Работа состоит из трех глав, введения, заключения и списка литературы.

В первой главе описаны особенности физик географического положения Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов и основные гидрометеорологические характеристики важные для изучения изменчивости характеристик внутреннего волнения в районе.

Во второй главе приставлены основы применяя радиолокации для изучения внутреннего волнения, а так же использованные материалы, и методы обработки радиолокационных изображений.

В третьей главе показана пространственно – временная изменчивость проявлений КВВ по сезонам и в целом за год. Также выявлены возможные механизмы генерации зарегистрированных КВВ.

В данной работе использованы литературные источники и спутниковые данные. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 68 наименований (на русском языке – 49, на английском языке – 19).

Автор выражает благодарность Свергуну Егору Игоревичу, аспиранту 2 курса СПбГУ, младшему научному сотруднику СПбФ ИО РАН за помощь в освоении навыков работы со спутниковыми изображениями и обработки данных.

Глава 1. Особенности района исследования

1.1 Физико-географические особенности

В данной работе рассматривается область океанического шельфа и прилегающая к нему акватория около полуострова Камчатка и Курильских островов с координатами 44-57° с. ш. и 145-170° в.д (рис.1).

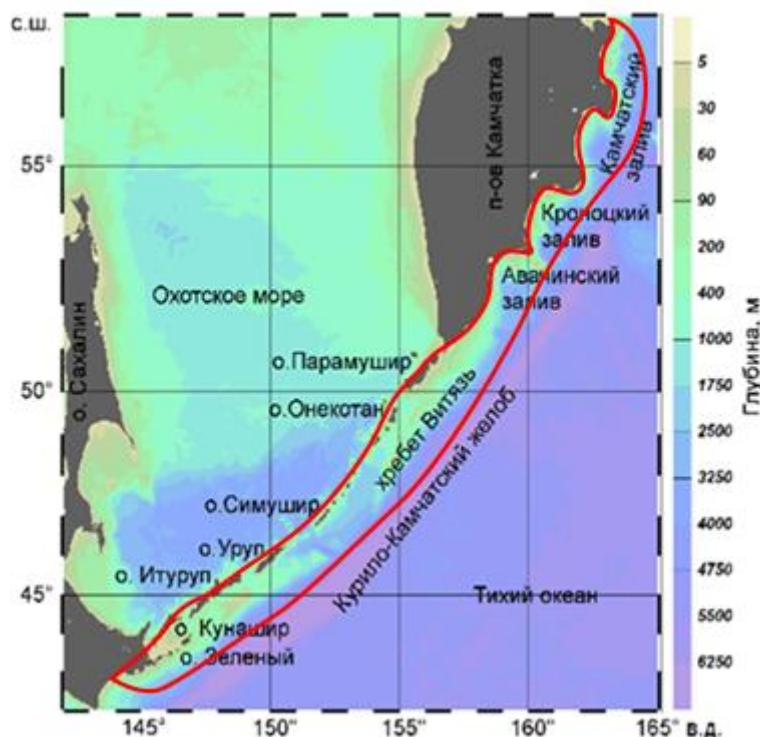


Рисунок 1. Обзорная карта рельефа дна Курило - Камчатского региона (изучаемый район выделен красной линией)

Курильские острова - это цепь вулканических островов, которые находятся между полуостровом Камчатка (Россия) и островом Хоккайдо (Япония). Они отделяют Охотское море от Тихого океана. Курильские острова в состав Сахалинской области (Россия). Их длина составляет около 1200 км. Площадь островов около 15,6 тыс. км². Состоят они из двух параллельных гряд островов - Большой Курильской и Малой Курильской (Шикотан, Хабомаи и др.).

Большая Курильская гряда делится на 3 группы: южная (Кунашир, Итуруп, Уруп, и др.), средняя (Симушир, Кетой, Ушишир и др.), северная (Ловушки, Шиашкотан, Онекотан, Парамушир и др.). Большая часть островов довольно гориста (высота 2339 м). Насчитывается около 40 действующих вулканов. Есть горячие минеральные источники. Также отмечается высокая сейсмичность. На южных островах преобладают леса, а северные покрыты в

основном тундровой растительностью. В данной области занимаются промыслом рыбы (кета и др.) и морского зверя (нерпа, сивуч и др.) (Советский Энциклопедический Словарь.1987).

Тихоокеанский (восточный) берег Камчатки, в географическом отношении, имеет множество бухт и заливов, протяженность которых составляет более 2 тыс. км. Омывается он Беринговым морем с северо-востока, а с юго - востока Тихим океаном. Морское дно у восточных берегов сильно изрезано крутыми склонами. На восточных берегах расположены полуострова Кроноцкий, Озерной, Камчатский и крупные заливы Корфа, Озерной, Камчатский, Кроноцкий и Авачинский. Авачинский в свою очередь является визитной карточкой полуострова и основным торговым портом Камчатского края. Столица Петропавловск- Камчатский находится на берегу бухты и встречает все судоходные объекты. Разделённый проливом Литке, недалеко от восточного берега Камчатки, в Беринговом море, расположился остров Карагинский. Население на острове отсутствует. Неподалеку от него можно встретить крупную популяцию китов, а на берегах острова найти кости этого животного, оставленные со времен забоя (Побережье Камчатки: два района [Электронный ресурс], 2021).

Рассматриваемая акватория характеризуется сложным рельефом дна, который наглядно показан на рисунке 1. С юго-востока исследуемого региона расположен подводный хребет Витязя. Он отделяется от Большой Курильской гряды междуговым прогибом и подразделяется на южное и северное плато. Глубина над поверхностью хребта колеблется от 150-200 м до 900-1000 м. На юго-восток его склон опускается к Курило - Камчатскому желобу, а на северо-запад - в сторону прогиба, который отделяет его от горного сооружения дуги (Леликов, Емельянова, 2011).

Далее на юго-восток расположен Курило - Камчатский желоб. Курило - Камчатский желоб является глубоководным желобом в Тихом океане. Простирается он с юго-запада на северо-восток вдоль подводных склонов острова Хоккайдо, Курильских островов и южной части полуострова Камчатка и до Камчатского пролива. По данным промера максимальные глубины выявлены вблизи устья каньона Буссоль и там она достигают 9550-9600 метров. Если смотреть с учетом поправки на изменение скорости звука с глубиной, то глубина составляет 9717 метров (Михайлов, 1970; Сваричевский и др., 1979). Это обуславливает довольно значительный перепад глубин на пути внутренней приливной волны из океана. Но относительные глубины Курило -Камчатского желоба гораздо меньше (2-4 км), так как они равны высоте склонов желоба. Курило -Камчатский желоб представляет собой дугу с шириной около 100 км, а протяженностью 2200 км, полого выпуклую к востоку (Гнибиденко и др., 1980; Геолого-геофизический атлас Курильской островной системы,1987).

1.2 Метеорологические характеристики

Рассматриваемая акватория является одной из самых динамически активных областей Тихого океана. Здесь отмечаются весьма сложные гидрологические условия. Это предопределено наличием пограничной зоны- зоны обмена через проливы водами субарктической структуры разных модификаций, которые переносятся потоками приостровных течений. Процессы обмена в проливах, усложнены переменными погодными условиями, которые связаны с муссонным характером атмосферной циркуляции.

Атмосферные процессы над данной акваторией довольно многообразны и сложны. Основной их особенностью в изучаемом районе является муссонный характер циркуляции атмосферы. Это означает, что преобладают юго-восточные ветра в период летнего муссона и обратные направления в зимний период. Известно (Давыдов, 1975; Иващенко и др., 1981; Корт, 1979; Крындин, 1964; Uda, 1962), что интенсивность развития муссонов может определяется изменчивостью крупномасштабных атмосферных процессов, которые связаны с состоянием основных центров действия атмосферы, регулирующих атмосферную циркуляцию над всей северной частью Тихого океана, тихоокеанским субтропическим максимумом, алеутским минимумом и сибирским зимним антициклоном. Из-за температурных контрастов между океаном и материком происходит сменяющееся от зимы к лету образование областей высокого и низкого давления. Благодаря этому происходит перемещение и смена воздушных масс. Таким образом, атмосферная циркуляция в данном районе приобретает выраженный муссонный характер. Во время температурных контрастов между материком и океаном, когда они становятся максимальными (в частности, зимой), возникает интенсивная циклоническая циркуляция, которая сопровождается сильными ветрами.

Зимой (с декабря по март), когда над материком устанавливается мощный сибирский антициклон, а над всей северной частью Тихого океана простирается алеутский минимум, имеет место устойчивый вынос холодных континентальных воздушных масс в направлении дальневосточных морей, который сопровождается ветрами северо-западных и северных румбов. Когда у северо-западного зимнего муссона наблюдается наибольшее развитие, в районе Курильской гряды и полуострова Камчатка — на восточной периферии области высокого давления и западной периферии алеутской депрессии, господствуют сильные ветры при прохождении глубоких циклонов. Область наибольшей повторяемости циклонов располагается к востоку от острова Хонсю и Курильских островов. Когда циклоны выходят на острова, сюда поступают относительно теплые и влажные (около -3°C) воздушные массы с океана. Во время сильного ветра северных румбов температура воздуха может опускаться

ниже -10°C . Повторяемость сильных ветров со скоростью более 15 м/с обычно составляет более 22 % в северных районах гряды и около 20% — в южных районах (Добровольский, 1968; Охотское море. Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1998). На протяжении всей гряды преобладает направление ветров северо-западное и западное. Сильные ветры приводят к интенсификации вдоль берегового Курило - Камчатского течения, а также к возникновению значительного волнения. Повторяемость крупных волн (высотой около 5 м и более) с тихоокеанской стороны гряды достигает 8 %. Направление волнения северо-западное и соседних с ним румбов.

Весной (с апреля по июнь) в связи с изменением контрастов температуры между океаном и материком циркуляция воздушных масс над умеренными широтами приобретает зональное направление. Барическая ситуация изменяется. Сибирский антициклон разрушается и почти исчезает алеутский минимум, наблюдается тенденция усиления северотихоокеанского максимума и смещение его к северу. Переход от типичной зимней циркуляции к типичной летней начинается, как правило, в мае. Основной очаг повышенной повторяемости числа дней с циклонами, который расположен зимой к востоку от Курильских островов, распадается весной на отдельные не очень большие очаги. Северо-западный муссон ослабляется. Повторяемость сильных ветров в северной части гряды уменьшается до 15 %, у южных Курильских островов - до 10 %. Интенсивность проходящих циклонов резко падает. Соответственно уменьшается повторяемость сильного волнения (до 1 %), изменяется направление волнения - от северо-западного к юго - западному (Охотское море. Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1998).

Летом (с июля по сентябрь) атмосферная циркуляция характеризуется двумя депрессиями, одна из которых географически тяготеет к акватории Охотского моря, другая представляет собой слаборазвитую алеутскую депрессию, тяготеющую к заливу, Аляска. Если в холодный период года северотихоокеанский максимум, располагаясь в южных широтах, существенного влияния на гидрометеорологические условия исследуемого района не оказывает, то в теплый период года картина уже меняется. Летом, когда развивается юго-восточный летний муссон, над прилегающей акваторией Тихого океана и Курильским островам повсеместно господствуют слабые и неустойчивые ветры обычно южных, юго-восточных румбов. Здесь же наблюдается очаг наибольшей повторяемости циклонов, которые несут влажные океанские менее прогретые воздушные массы (температура воздуха в районе Курильских островов обычно не поднимается летом выше 10°C в северной части гряды и не превышает 15°C - в южной) (Охотское море. Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1998). Основная ось наибольшей повторяемости числа дней с циклонами направлена от острова

Хонсю, вдоль южных Курильских островов на северо-восток в океан. Волнение в районе южной и центральной частей Курильской гряды приобретает юго-западное направление. Тем самым способствует нарушению струйности Курильского течения, вихреобразованию в прикурильском районе и внедрению трансформированных вод курильской модификации (Богданов, Мороз, 2000) в зону течения. В северной части гряды наряду с южным направлением волнения также часто наблюдается и северо-западное. Нужно отметить, что повторяемость волнения с высотой волн более 2,5 м невелика.

Осенью (с октября по ноябрь) типичное барическое поле уже все более приобретает черты зимнего характера. В переходный период к холодному полугодию над Евразийским материком снова начинает формироваться область высокого давления, ослабляется и смещается южнее тихоокеанский максимум, над акваторией данного района создаются условия для усиления циклонической деятельности. В осенний период очень резко возрастает интенсивность проходящих циклонов и это влечет усиление скорости ветров, которые генерируют более крупные волны. Повторяемость волн высотой 5,0 м и более с океанской стороны вдоль побережья Курильской гряды возрастает до 4-5 % от общего числа высот волн (Добровольский, 1968). Над исследуемой акваторией заметно преобладание ветров западных, северо-западных румбов, и изменяется направление волнения, и интенсификация Курило - Камчатского течения (Богданов, Мороз, 2000).

Изменчивость атмосферной циркуляции определяет направление переноса воздушных масс и интенсивность, что в свою очередь влияет на состояние подстилающей морской поверхности (интенсивность и направление волнения, динамика движения ледовых массивов в холодное полугодие, системы течений и т. п.). Состояние подстилающей поверхности в значительной мере связана с приземными ветровыми условиями. В холодное полугодие наблюдаются интенсификация атмосферных процессов и наибольшее термодинамическое воздействие на океан. Многие исследования показывают (Бобков, 1989; Бобков, Самко, 1989; Бобков, 1990; Бобков и др., 1991; Богданов, Мороз, 1998; Мороз, 1999; Самко, Фукс, 1992; Cavailery, Parcinson, 1987; ShinijiFukutaro, 1972), что муссонный характер атмосферной циркуляции в значительной степени определяет и сезонную временную изменчивость интенсивности развития системы прикурильских течений и водообмена через проливы, а соответственно, и структуры вод. Изменчивость гидрометеорологических условий исследуемого района на фоне топографических особенностей и приливоотливных процессов определяет пространственную изменчивость структуры вод как прикурильского района, так и зоны Курило - Камчатского течения - от побережья полуострова Камчатка до субарктического фронта (Богданов, Мороз, 2004).

1.3 Гидрологические характеристики

Основным структурообразующим элементом динамики в регионе являются Курило - Камчатское течение и его продолжение- течение Ойясио (рис.2).

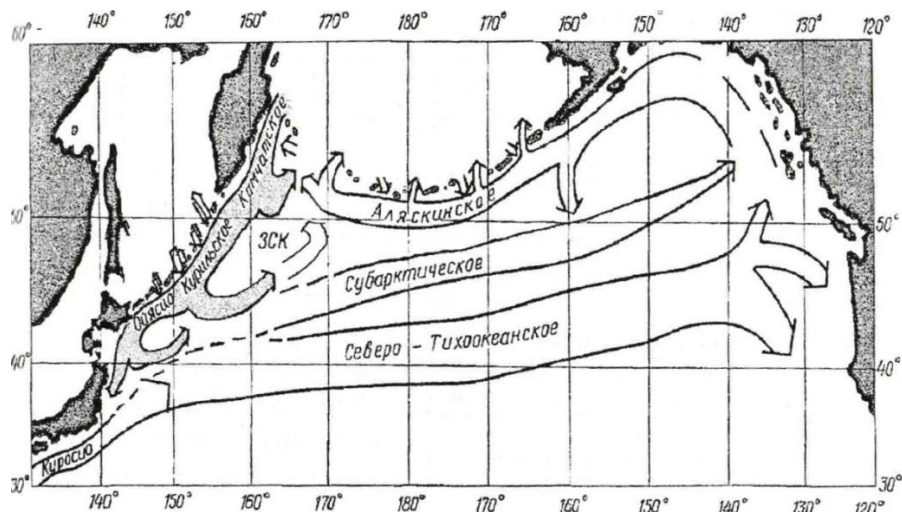


Рисунок 2. Схема циркуляции вод северо-западной части Тихого океана (Богданов, Мороз, 2004)

Курило - Камчатское течение является западным составляющим звеном субарктического круговорота Тихого океана, и оно играет довольно существенную роль в изменчивости гидродинамических процессов данного региона. Как холодное пограничное течение оно играет важнейшую роль в межширотном обмене вод, перенося при этом холодные и малосоленые воды в умеренные широты из высоких широт и поддерживая квазистационарное состояние океанологических характеристик, которое наблюдается в Тихом океане. Западные пограничные течения концентрируют все изменения, происходящие на просторах крупномасштабных круговоротов, которые течения замыкают с запада.

Структурные особенности вод прикурильского района Тихого океана связаны с Курильским течением, которые являются западным пограничным потоком в субполярной круговой циркуляции северной части Тихого океана, направленным на юго-запад вдоль Курильской гряды (Бурков, 1958; Жуков, 1954; Морошкин, 1955; Сметанин, 1959). Установлено, что это течение переносит воды субарктической структуры. Для субарктической структуры вод прикурильского района Тихого океана имеют место следующие характеристики водных масс:

1. Поверхностная водная масса (0-60 м), весной $T^{\circ}=2-3^{\circ}$, $S=33,0\text{‰}$, летом $T^{\circ}=8^{\circ}$, $S=33,0\text{‰}$.
2. Холодный промежуточный слой (60-200 м), $T^{\circ}_{\min}=-0,3^{\circ}$, $S=33,3\text{‰}$ с ядром на глубине 75-125 м.

3. Теплый промежуточный слой (200-800 м), $T^{\circ}_{\max}=3,5^{\circ}$, $S=34$, 1‰ с ядром на глубине 300-500 м.

4. Глубинная (800-3000 м), $T^{\circ}=1,7^{\circ}$, $S=34,7$ ‰.

5. Придонная (более 3000 м), $T^{\circ}=1,5^{\circ}$, $S=34,7$ ‰.

Поверхностная водная масса формируется в весенне-летний период, когда на нее влияет прогрев верхнего слоя вод. Толщина поверхностного слоя вод вблизи Курильской островной дуги со стороны Тихого океана достигает около 30-35 м, при температуре воды не более чем 8° . По мере приближения к Курильским проливам поверхностный слой вод существенно уменьшается по толщине и температура в нем падает до менее чем 3°C началом осенне-зимнего выхолаживания поверхностного слоя воды, под влиянием конвективного, ветрового и приливного перемешивания данный слой разрушается, а его температура падает до температуры ядра холодного промежуточного слоя. В зимний период времени до начала весенне-летнего прогрева поверхностных вод, поверхностная водная масса полностью разрушается, а верхняя граница холодного промежуточного слоя выходит на поверхность моря, и он можно сказать перестает быть промежуточным. Данная сезонная перестройка двух верхних слоев вод характерна для всей субарктической структуры вод в северо-западной части Тихого океана, будь то Тихий океан или Курильские проливы.

Холодный промежуточный слой - это одна из характерных особенностей субарктической структуры вод северо-западной части Тихого океана. На основе анализа данных многолетних, гидрологических наблюдений в северо-западной части Тихого океана (Мороз, 1985) было установлено различие характеристик этого слоя в направлении от океана к шельфу островов. Во-первых, мощность (толщина) слоя увеличивается от 100 до 200 метров, во-вторых, минимальная температура в ядре слоя увеличивается на величину около 1°C , в-третьих, из-за малой глубины на шельфе слой не подстилается теплым промежуточным слоем, а распространяется практически до самого дна. Характеристики холодного промежуточного слоя имеют сезонную, а также межгодовую изменчивость. Сезонное формирование и разрушение слоя в направлении от океана к шельфу происходит не совсем однозначно. На шельфе время максимального охлаждения и окончания осенне-зимней конвекции наступает раньше (уже в декабре на шельфе температура воды практически однородна до дна, а в океанской части района холодный промежуточный слой еще существует). В весенний период на шельфе прогрева поверхностных вод в открытом море и происходит образование поверхностного слоя. Межгодовая изменчивость характеристик холодного промежуточного слоя проявляется в зависимости от суровости зимнего периода района - изменяются температурные индексы ядра слоя и время его формирования, а также и разрушения.

Теплый промежуточный слой, как и холодный промежуточный слой тоже является характерной особенностью субарктической структуры вод Тихого океана. На данный момент уже известно, что характеристики теплого промежуточного слоя в океане практически постоянны, но в направлении к зоне Курильских проливов наблюдается ослабление данного слоя. Такая информация дает возможность идентифицировать эту водную массу при исследовании водообмена через проливы и при анализе типов структуры вод региона.

Известно, что довольно существенную роль в структурообразовании водных масса прикурильского района играет Курильское течение (Бобков и др., 1991; Богданов, Мороз, 1998, Жуков. 1954; Мороз, Новожилов, 1985; Морошкин, 1985). Меандрируя и образуя систему вихрей различного знака вращения, течение переносит более холодные водные массы северного происхождения на юг. Поэтому здесь часто наблюдаются линзообразные образования ядер холодного промежуточного слоя, так как стрежень Курильского течения совпадает с зоной минимальных значений температуры холодного промежуточного слоя. На протяжении всего Курильского течения наблюдается полоса более низких температур в холодном промежуточном слое по сравнению с окружающими водами. По исследованиям В.А. Буркова (Бурков, 1958) в Курило - Камчатском районе в весеннее время обнаружено, что изотерма нулевой температуры слоя довольно хорошо повторяет вдольбереговую линию при этом отгораживая узкую полосу с низкой температурой, которая примыкает к береговой черте. Однородность минимальной температуры в меридиональном направлении и полоса низких вдольбереговых температур, по мнению автора, приводят к выводу о формировании отрицательной температуры холодного промежуточного слоя у тихоокеанского побережья полуострова Камчатка.

В исследовании (Gawarkiewicz, Chapman, 1992) был описан механизм формирования фронта в районе материкового склона континентального шельфа. Где при продвижении потока вдоль берега воды шельфа продвигаются от берега. Такой поток переносит легкие воды под тяжелые и таким образом формируются однородный вертикальный профиль над шельфом и вертикальное конвективное перемешивание. В районе, где начинается материковый склон придонный пограничный слой отрывается и отмечается подъем изолинии температуры. О формировании внутрискрутного фронта в данном районе говорится в работах (Гладышев, 1994; Жуков, 194). Пространственное положение фронта здесь определяется особенностями водообмена через проливы и рельефом дна. Южнее пролива Буссоль фронт уже не прослеживается как единое целое в связи с тем, что струя Курило - Камчатского течения активно смешивается с трансформированными водами Охотского моря, которые вытекают из пролива Буссоль, частично образуя при этом воды течения Ойясио, и разделяется на

отдельные ветви. Выносимые трансформированные в проливе охотоморские воды холоднее, чем воды Курило - Камчатского течения. Иногда у Курильских островов обнаруживаются необычно холодные и распресненные воды в промежуточных слоях толщиной около 100 метров с горизонтальными масштабами порядка 150 км (Talley, 1991).

Воды Тихого океана у северных проливов Курильской гряды значительно отличаются от вод в районе южных проливов. Воды Курило - Камчатского течения, сформированные очень холодными и более опресненными водами восточного побережья полуострова Камчатка и тихоокеанскими водами, при движении вдоль проливов Курильской гряды смешиваются с трансформированными в проливах водами Охотского моря в результате водообмена через проливы. В результате чего воды течения Ойясио формируются смесью охотоморских вод, трансформированных в проливах, и водами Курило - Камчатского течения (Богданов, Мороз, 2000).

Приливные явления в этом районе являются доминирующим фактором, который определяет локальную динамику вод в проливах. Также в значительной мере определяют изменения в вертикальной и горизонтальной структуре вод в проливах. На рисунке 3 показаны максимальные величины приливов в северо-западной части Тихого океана.

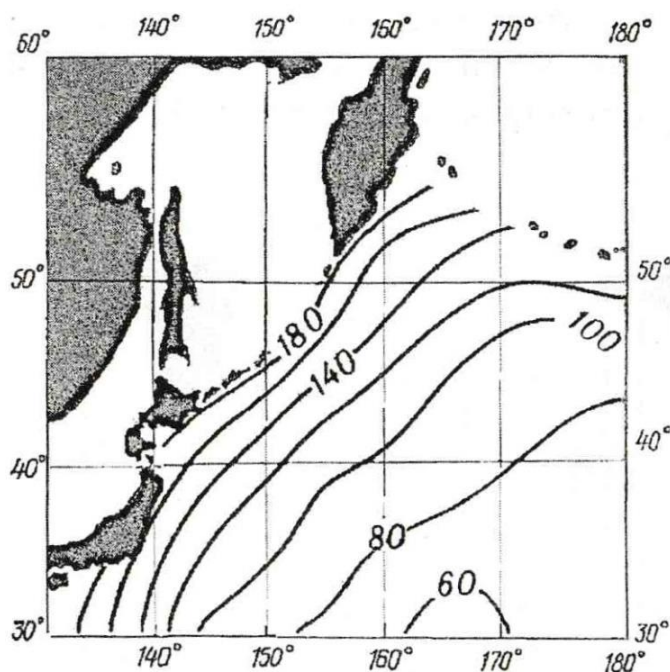


Рисунок 3. Максимальная величина приливной волны (в см) на северо - западе Тихого океана (Богданов, Мороз, 2004)

Из-за приливного перемешивания вод в проливах в приповерхностных слоях в летний период происходит охлаждение воды, а в зимний период- потепление. Результатом этого

является то, что летом вдоль Курильской гряды распространяется полоса более холодных вод, которая обуславливает постоянные густые туманы (Богданов, 1972).

Приливные явления в районе Курильской гряды главным образом формируются приливными волнами, распространяющимися из Тихого океана. Приливные волны в северо-западной части Тихого океана имеют в основном поступательный характер и движутся при этом в юго-западном направлении вдоль Курильской гряды (Богданов, 1975; Богданов и др., 1991). Скорость перемещения приливных волн в океане при подходе к Курильской гряде составляет 250-400 узлов. Амплитуда приливных колебаний уровня в зоне гряды обычно не превышает 1м, а скорость приливных течений составляет около 10-15 см/с.

Для предвычисления приливных течений в Курильских проливах используют гармонические постоянные приливных колебаний уровня главных составляющих волн прилива M_2 , S_2 , K_1 и O_1 , которые сняты с соответствующих приливных карт с помощью линейной интерполяции в выбранной точке (рис.4) [23].

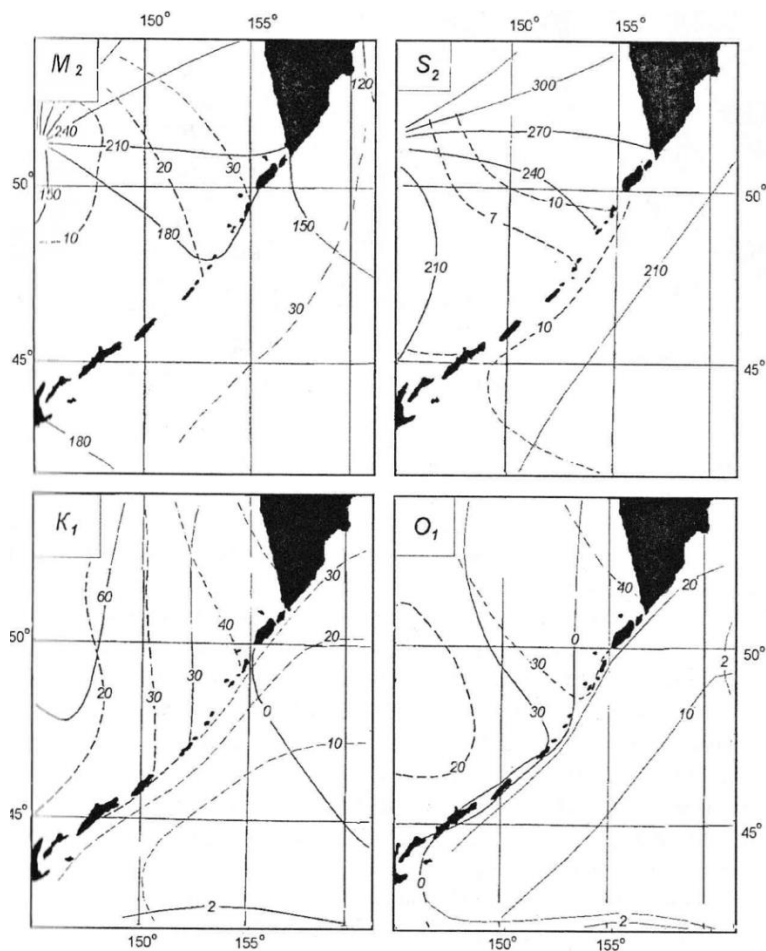


Рисунок 4. Приливные карты главных составляющих волн прилива (Богданов, Мороз, 2004)

M_2 , S_2 – полусуточные составляющие волн прилива, K_1 и O_1 – суточные составляющие. Приливные карты четырех главных составляющих волн прилива являются необходимыми и

достаточными исходными данными для предвычисления ежечасных высот приливного уровня и времени наступления полных и малых вод на любые календарные сутки в любой точке акватории морей, в том числе, на островах и побережье, там где нет надежных фактических значений гармонических постоянных прилива.

Фазовая скорость приливных волн в Курильских проливах уменьшается, а амплитуда приливных колебаний уровня увеличивается до 1,7-2,5 м. Скорости приливных течений обычно возрастают до 5 узлов и более. В связи с многократным отражением приливных волн от берегов Охотского моря в самих проливах имеют место сложные поступательно-стоячие волны. Чем сложнее рельеф дна проливов и более изрезана береговая линия островов, тем сложнее становится структура приливного потока. В проливах приливные явления могут быть существенно нелинейными, когда в открытых районах морей и океанов приливные явления хорошо описываются линейной теорией, для которой выполняется принцип суперпозиции - простого сложения волн от различных источников. В результате встречи приливных течений с различными скоростями и движущихся с различных направлений возникают водовороты и приливные вихри. На стыках приливных противотечений образуются полосы пены и сулои, которые повсеместно встречаются в проливах Курильской гряды. Сулои могут достигать высоты 1,5 м. Особенно эффектны и часты сулои в проливах Екатерины, Фриза и Буссоль, где благодаря противоположно направленным приливным потокам они могут наблюдаться вдоль проливов. Пространственная неравномерность скоростей приливных течений, связанная с трением приливного потока о дно и берега проливов, их взаимодействия с постоянными течениями, а также с суперпозицией приливных потоков приводит к сдвиговой динамической неустойчивости приливных течений. В результате этого образуются вихри различного масштаба и, как важное следствие, интенсивное приливное перемешивание, которое приводит к выравниванию океанологических характеристик в вертикальном и горизонтальном направлении (Богданов. Мороз, 2000).

Это главный, но не единственный механизм перемешивания вод в проливах. С точки зрения только этого механизма трудно объяснить некоторые наблюдаемые эффекты приливного перемешивания вод в Курильских проливах.

Во-первых, не ясны причины северной локализации зон наиболее интенсивного приливного перемешивания в каждом из проливов.

Во-вторых, наиболее интенсивное приливное перемешивание можно было бы ожидать в моменты времени, когда скорости приливного течения достигают максимума. Имеются наблюдения, не вполне соответствующие этому. Возможно, на этот процесс определенное влияние оказывают внутренние приливные волны, интенсивно развивающиеся в проливах -

бароклинной составляющей приливных явлений. На рисунке 5 приведен пример изоплет температуры и солености воды из измерений суточной станции в проливе Фриза, характеризующие наличие внутренних приливных волн.

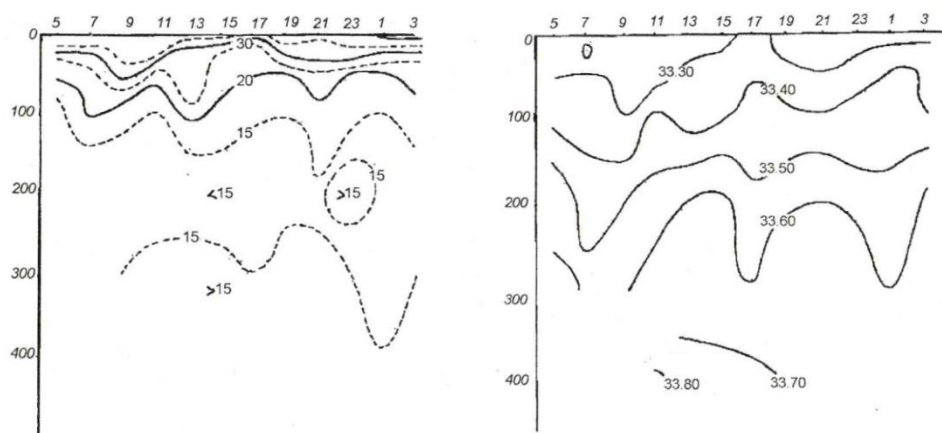


Рисунок 5. Изоплеты температуры и солености на суточной станции в проливе Фриза (Богданов. Мороз, 2000)

1.4 Внутренние волны

В целом спутниковые изображения показывают, что распространение внутренних волн неравномерно и в основном это связано с неровностью рельефа (Jackson, Apel, 2004).

Короткопериодные внутренние волны, у которых частота колебаний характеристик среды много больше инерционной частоты являются фактором повышенного вертикального перемешивания и они вносят большой вклад в изменчивость гидрофизических полей на масштабах от нескольких десятков метров до нескольких километров и в интервалах от нескольких минут до нескольких десятков минут. Они возникают в результате трансформации низкочастотных внутренних волн, среди которых энергетически доминируют внутренние волны приливного, а также инерционного происхождения.

Исследования характеристик короткопериодных внутренних волн и их связь с крупномасштабными процессами в данном районе представлены немногочисленными работами (Епифанова и др., 2019). При обобщении данных спутниковых и контактных наблюдений было выявлено, что вблизи океанского побережья Камчатки наблюдается довольно сложная картина цугов короткопериодных внутренних волн, которые взаимодействуют друг с другом и с меандрами Камчатского течения. Распределение их по акватории залива неравномерно, регистрируются КВВ как над большими глубинами, так и в мелководных частях залива. Значительное число их проявлений направлено к берегу, но существуют волны, направленные в открытый океан. Существование таких волн, которые направлены в открытый океан, может быть объяснено довольно сильной круизной шельфа в Авачинском заливе. Луч внутреннего прилива, отраженный от шельфа, выходит близко к поверхности и распадается на мелкие солитоноподобные волны. Поверхностные проявления короткопериодных внутренних волн имеют изогнутую структуру, такое проявление связано с рефракцией волн, когда они взаимодействуют с меандрами Камчатского течения. В Авачинском заливе короткопериодные внутренние волны могут наблюдаться на больших глубинах и распространяться в направлении берега. Это связано с усилением внутреннего прилива, который идет со стороны океана, отраженным от шельфа внутренним приливом. Проявляющиеся с приливной периодичностью интенсивные ВВ высотой 10-15 м – это типичное явление для шельфа полуострова и для прилегающих участков материкового склона (Сабинин, Серебряный, 2007).

В работе (Свергун, Зимин, 2020) на основе обобщенных результатов экспедиционных исследований, которые проводились в августе – сентябре 2018 года в Авачинском заливе и данных дистанционного зондирования высокого разрешения было показано, что ВВ высотой

5 - 8 метров хорошо проявляются на поверхности при глубине залегания пикноклина от 10 до 20 метров.

В заключение отметим, что на данный момент существуют не полные, а только отрывочные сведения о проявлениях короткопериодных внутренних волн, которые ранее были зарегистрированы у берегов Камчатки.

Глава 2. Материалы и методы

2.1 Спутниковые методы наблюдения за внутренними волнами

В работе для регистрации внутреннего волнения были взяты РЛИ с аппаратов Sentinel-1A и B. Отметим, что радиолокационное зондирование в сверхвысокочастотном диапазоне один из основных методов дистанционного изучения океанических процессов, а также взаимодействия океана и атмосферы.

У радиолокационной съемки океана из космоса по получению информации о мгновенном состоянии океана существует ряд преимуществ:

- 1) Круглосуточная работа из-за использования активного зондирования (характеристики изображений от времени суток не зависят)
- 2) Всепогодность съемки. Это связано с тем, что для микроволнового излучения атмосфера практически прозрачна.
- 3) В микроволновом диапазоне диэлектрические свойства воды однородны. Такое свойство может позволять считать вариации рассеянного сигнала связанными только с геометрическими параметрами возмущений, что значительно облегчает интерпретацию снимков.

Радиолокационная съемка дает возможность получения изображений с высоким пространственным разрешением (может достигать нескольких метров) в широкой полосе обзора и не зависит от облачного покрова и естественного освещения (времени года и суток).

Активное дистанционное зондирование поверхности основано на измерении вариаций рассеянного излучения. В дистанционном зондировании океана используют радиолокационные станции (РЛС). Такими станциями может быть радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) спутникового базирования. Разрешение Δx в продольном направлении можно улучшить, если использовать технику «синтезирования апертуры». Этот метод предусматривает специальную когерентную (с сохранением фазы) обработку рассеянных сигналов в течение некоторого времени Δt , за которое самолет или спутник, движущийся со скоростью v , пролетает расстояние $v \Delta t$. Расстояние $\Delta L_{\text{синт}} = v \Delta t$ играет роль длины синтезированной антенны и может в сотни и тысячи раз превышать физические размеры бортовой антенны L_a . При $\Delta L_{\text{синт}} = 5$ км, длине волны 5 см и наклонной дальности $R = 1000$ км разрешение Δx составит 5 м. Весьма высокое разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой сочетается со способностью работать в условиях облачности и в темное время суток. В этом их главное преимущество перед приборами видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов.

Информация о параметрах подстилающей поверхности содержится в функции отражения, которая наблюдается в виде отраженной от взволнованной морской поверхности электромагнитной волны в зоне приемной антенны. Функция отражения определяется свойствами самой поверхности, а также условиями ее формирования (системой испускаемых и принимаемых сигналов). РЛ - образ морской поверхности зависит от поляризации излучения, угла падения зондирующего сигнала и диапазона зондирования.

Электромагнитную волну испускает излучающее устройство радиолокатора. Основными характеристиками электромагнитной волны являются: частота $f = C/\lambda$, где C - скорость распространения электромагнитных волн в среде (в вакууме $3 \cdot 10^8$ м/с); длина λ ; волновой вектор, который указывает направление распространения волны и поляризация электромагнитной волны. Поляризация является очень важным свойством, так как ориентация плоскости поляризации по отношению к отражающей поверхности определяет коэффициент отражения волны.

Радиолокаторы с длинами волн от 1,11 см (частота $f = 27$ ГГц) и до 30 см (частота $f = 1$ ГГц) используются для изучения океана. Подобные радиолокаторы обычно работают в импульсном режиме, но иногда применяется и непрерывное излучение.

При радиолокационном зондировании Земли используются зондирующие сигналы с различной поляризацией (вертикальной или горизонтальной). Плоскостью поляризации называется плоскость, которая проходит через направление распространения электромагнитной волны и направление вектора электрического поля. В момент, когда плоскость поляризации в конкретной точке пространства сохраняет фиксированное положение, то такую волну называют плоско или линейно поляризованной. Ориентацией вектора электрического поля E в плоскости, перпендикулярной направлению распространения радиоволны определяется поляризация излучения. При наблюдении горизонтальной поляризации излучения, вектор электрического поля E_H расположен параллельно подстилающей поверхности. В случае вертикальной поляризации вектор излучения E_V будет направлен под углом падения к местной вертикали (рис.6).

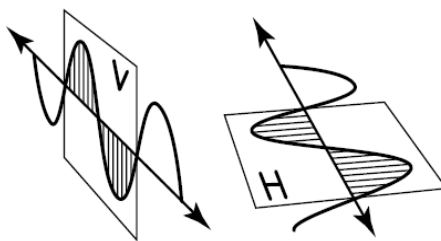


Рисунок 6. Вектор электрического магнитного поля при горизонтальной (H) вертикальной (V) поляризациях зондирующего сигнала (Лаврова и др., 2011)

РЛС приемо-передающие системы в зависимости от режима работы и конструктивных особенностей могут осуществлять прием и излучение:

- 1) горизонтальной поляризации (HH);
- 2) на вертикальной поляризации (VV);
- 3) перекрестных поляризациях (VH и HV).

Мощность обратно - рассеянного сигнала, который попадает в приемную антенну РЛС, зависит от типа поляризации излучения и также зависит от взаимного направления поляризаций при приеме и излучении. Обычно коэффициент рассеяния водной поверхности с вертикальной поляризацией несколько выше, чем при горизонтальной и перекрестных поляризациях.

С помощью вертикальной поляризации изучается широкий класс процессов и явлений, которые могут проявляться на морской поверхности посредством модуляции гравитационно-капиллярной составляющей спектра поверхностного волнения. Горизонтальную поляризацию, менее чувствительную к вариациям мелкомасштабной шероховатости морской поверхности, довольно широко применяют для разделения РЛ - образов ледяного покрова и открытой воды, а также для наблюдения морских льдов (Лаврова и др., 2011).

Сам принцип формирования изображения водной поверхности показан на рисунке 7. Когда поверхность гладкая, то происходит зеркальное отражение зондирующего сигнала, отраженный сигнал не попадает в принимающее устройство радиолокатора. В итоге такое радиолокационное изображение будет выглядеть темным, как видно на рисунке 7 а). В случае, когда поверхность шероховатая (рис.7 б)) происходит диффузное отражение сигнала (часть отраженной радиации доходит до принимающего устройства). То есть, чем шероховатей поверхность, тем радиолокационное изображение получается ярче. Из - за обратного рассеяния радиоволн на гравитационно-капиллярных волнах за счет резонансного брэгговского механизма формируется полезный сигнал.

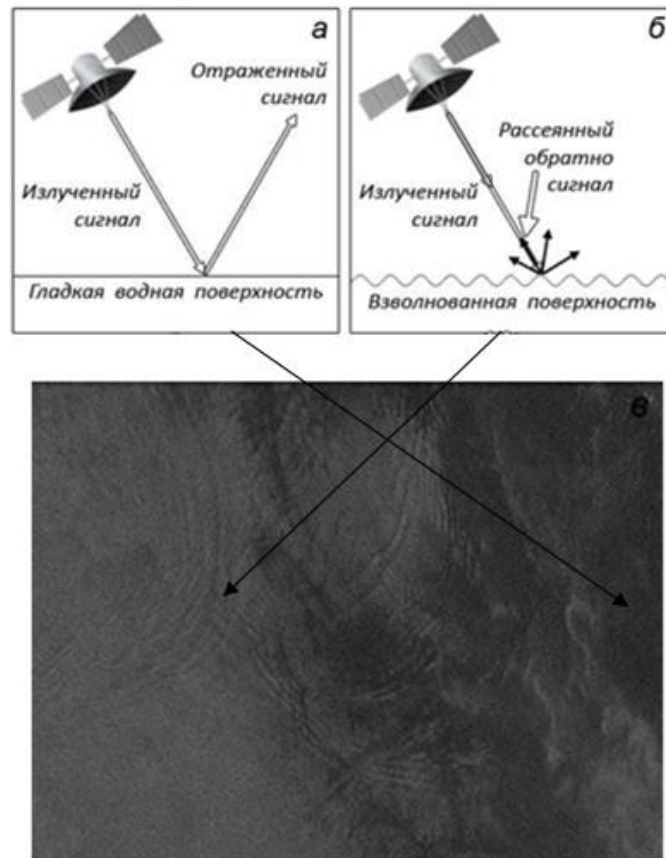


Рисунок 7. Схема отражения радиолокационного сигнала в условиях а) гладкой и б) взволнованной водной поверхности с демонстрацией получаемых в результате контрастов амплитуды отраженного сигнала на примере РЛИ, полученного Sentinel-1 03.08.2019 г. в 19:32:05 UTC(в)

Поверхностные проявления внутреннего волнения в океане представляют собой особый интерес. Амплитуда внутренних волн может составлять в океане около ста метров, длины волн могут составлять несколько километров, но при этом колебания водной поверхности обычно совсем ничтожны. Однако, при особых условиях внутренние волны все же могут проявляться на поверхности океана, модулируя при этом ветровую рябь орбитальными течениями (Ермаков и др., 1980; Басович и др., 1982; Баханов, Таланов, 1999; Горшков и др., 2003). Поверхностные проявления внутренних волн отображаются на РЛИ морской поверхности в виде чередующихся полос усиления и ослабления радиолокационного сигнала (рис.8), которые обусловлены модуляцией мелкомасштабной составляющей спектра поверхностного волнения переменными течениями, которые создаются в приповерхностном слое внутренними волнами (Alpers, 1985).

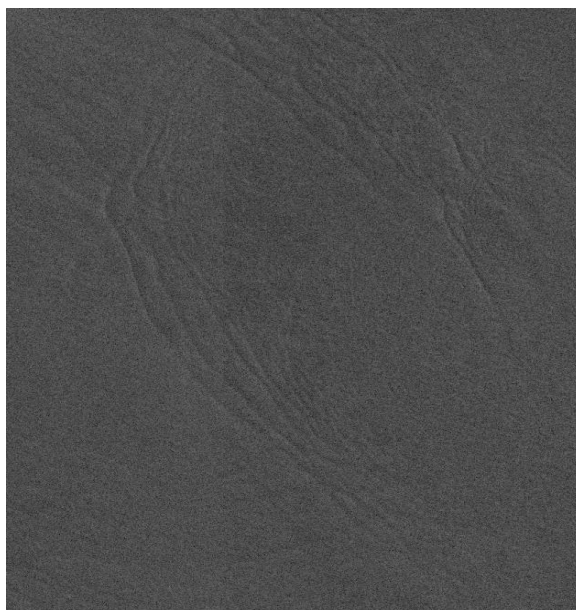


Рисунок 8. Пример поверхностного проявления КВВ на радиолокационном изображении, полученном Sentinel-1 14.07.2019 г.

2.2. Описание исходных данных и методов их обработки

В данной работе для регистрации поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн были использованы радиолокационные изображения с аппаратов Sentinel - 1A и B в C-диапазоне с VV - поляризацией и режимом съемки IW с разрешением 20 метров и шириной полосы обзора 250 километров, охватывающие период с 1 декабря 2018 года по 30 ноября 2019 года. Характеристики режима съемки спутника Sentinel - 1 показаны в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики режима съемки спутника Sentinel-1 (Лаврова и др., 2016)

Характеристики режима съемки спутника Sentinel - 1			
Режим съемки	Ширина полосы, км	Разрешение, м	Поляризация
IW	250	20	VV

Проект «Copernicus», который реализуется Еврокомиссией совместно с Европейским космическим агентством, направлен на создание автономной многоуровневой системы наблюдения за экологической обстановкой на Земле. В рамках данного проекта предполагается, что на орбите будет находиться семь миссий спутников Sentinel. Сейчас запущено четыре спутника: Sentinel - 1A, Sentinel - 1B; Sentinel - 2A, Sentinel - 3A.

Данные спутников серии Sentinel предоставляются в свободном доступе и их можно скачать на сайте «SentinelsScientificDataHub» (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Общий вид ИСЗ представлен на рисунке 9.

Sentinel - 1A - это первый из семейства спутников, которые планируется запустить в рамках европейской программы Copernicus Sentinel-1A был выведен на орбиту 3 апреля 2014 г.. На нём установлен радиолокатор с синтезированной апертурой C - диапазона длин волн с центральной частотой 5,405 ГГц (5,55 см). Миссия Sentinel-1 является продолжением программ ERS-2 и Envisat.

Sentinel - 1B был выведен на орбиту 26 апреля 2016 г. На его борту установлен такой же радиолокатор. Группировка Sentinel - 1 обеспечивает съемками основные морские судоходные пути каждые 1-3 дня, независимо от погодных условий (Лаврова и др., 2016).

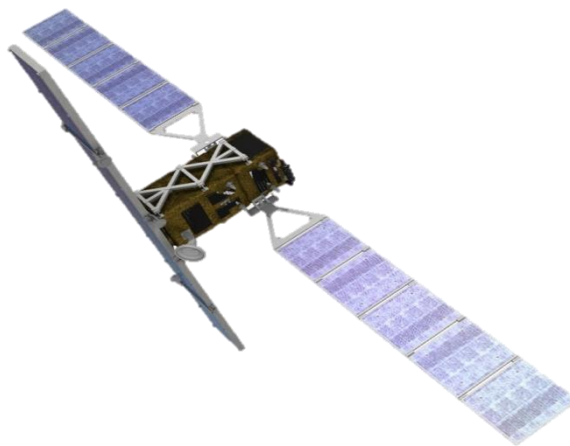


Рисунок 9. Общий вид ИСЗ Sentinel-1 (Sentinel-1: [Электронный ресурс], 2021)

Всего было использовано 827 РЛИ, из них 204 - за зиму, 195- за весну, 205- за лето и 223-за осень (таблица 2).

Таблица 2 Количество РЛИ

Месяц	Количество снимков
Декабрь	71
Январь	72
Февраль	61
Март	68
Апрель	68
Май	59
Июнь	63
Июль	68
Август	74
Сентябрь	71
Октябрь	77
Ноябрь	75
Всего	827

Как видно из рисунка 10, радиолокационные изображения полностью и практически равномерно покрывают исследуемую акваторию в течении всего изучаемого периода. В целом было обработано 827 РЛИ, в среднем на квадрат площади приходится около 60 снимков, а максимальное количество достигает до 100 снимков.

В среднем за каждый сезон было использовано около 200 снимков. По сезонам (рис.11) среднее покрытие спутниковых снимков Sentinel - 1 составляет около 15 штук на квадрат площади. Максимальное количество составляет до 30 РЛИ. Видно, что покрытие за каждый сезон практически равномерное. Выделить можно район возле бухты Вестник, в котором за

осенний период (рис.11 г) наблюдается около 10 снимков на квадратный метр, в отличие от других сезонов, где в этой области покрытие составляет около 15 снимков на квадратный метр.

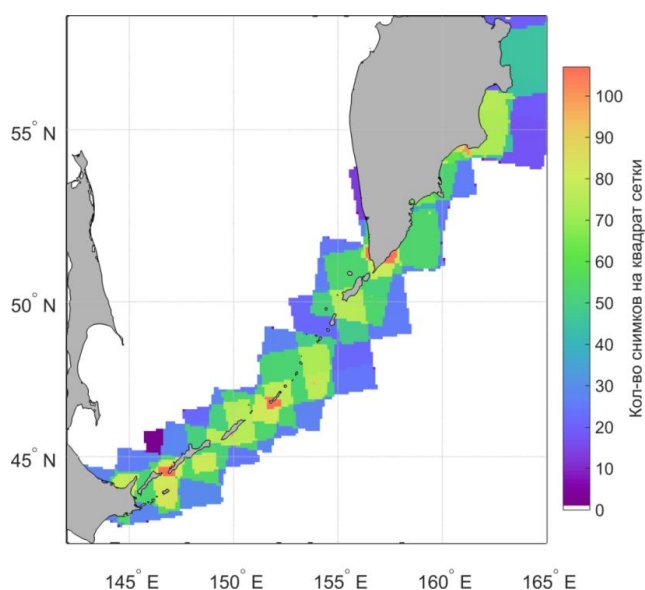


Рисунок 10. Карта с покрытием спутниковых снимков Sentinel - 1, используемых в работе за весь исследуемый период (с декабря 2018 года по ноябрь 2019 года)

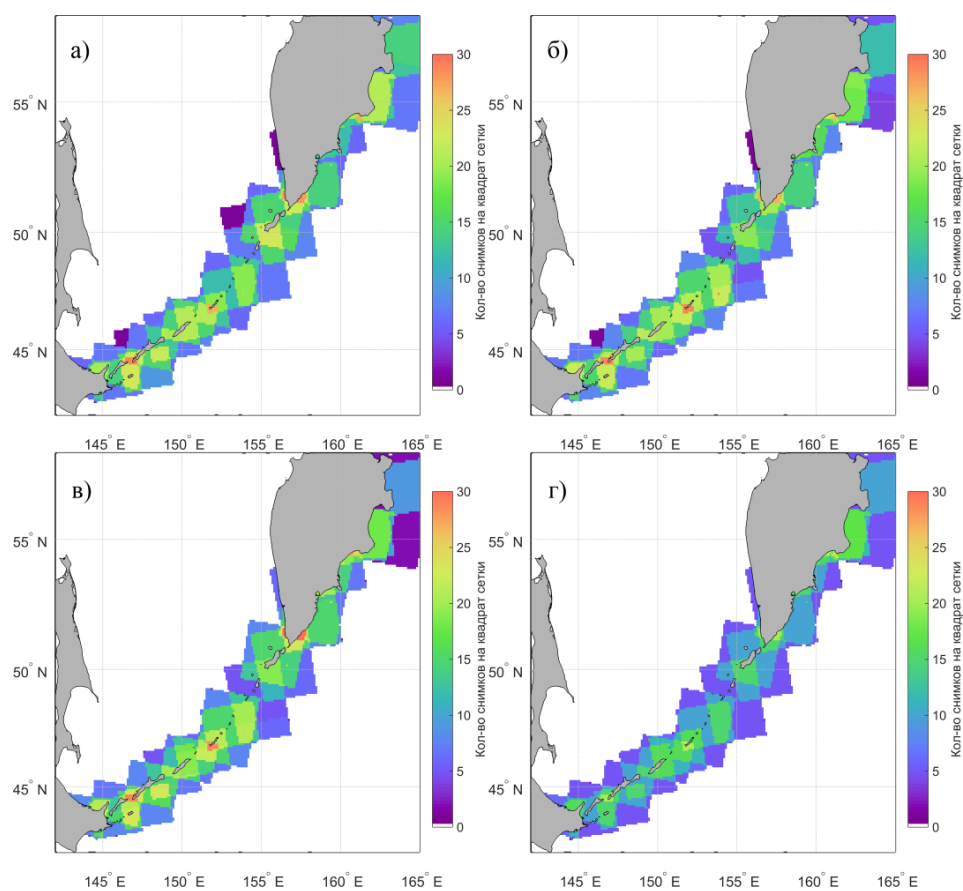


Рисунок 11. а) Карта с покрытием спутниковых снимков Sentinel-1, используемых в работе за зимний период; б) За весенний период; в) За летний период; г) За осенний период

Изучать характеристики внутреннего волнения из космоса можно по их поверхностным проявлениям, которые схематически показаны на рисунке 12. Так для того, чтобы в дальнейшем стало возможным оценить пространственное распределение в исследуемом районе, были сняты географические координаты положения центра лидирующего гребня. Для анализа характеристик сняты такие характеристики как количество волн в пакете, длина волны, длина лидирующего гребня и направление распространения. В таблице 3 представлены все характеристики, которые были сняты в данной работе.

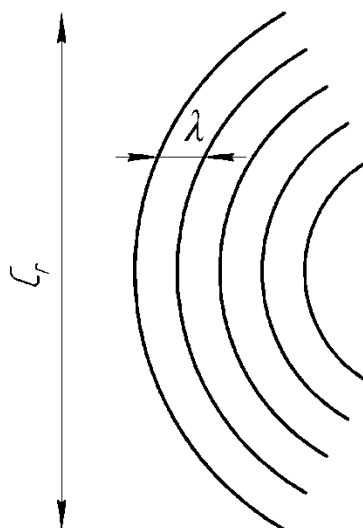


Рисунок 12. Схематическое представление пакета КВВ (ξ – длина лидирующего гребня, λ – длина волны)

Таблица 3 Характеристики внутреннего волнения

Характеристика
Положение проявления КВВ (географические координаты)
Количество волн в пакете, шт
Длина волны, м
Длина лидирующего гребня, км
Направление распространения, °

Детектирование волн на радиолокационных изображениях выполнено в программном обеспечении ESASNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>). На рисунках 13 и 14 приведены наглядные примеры того, как снимались такие характеристики, как длина волны и длина лидирующего гребня соответственно.

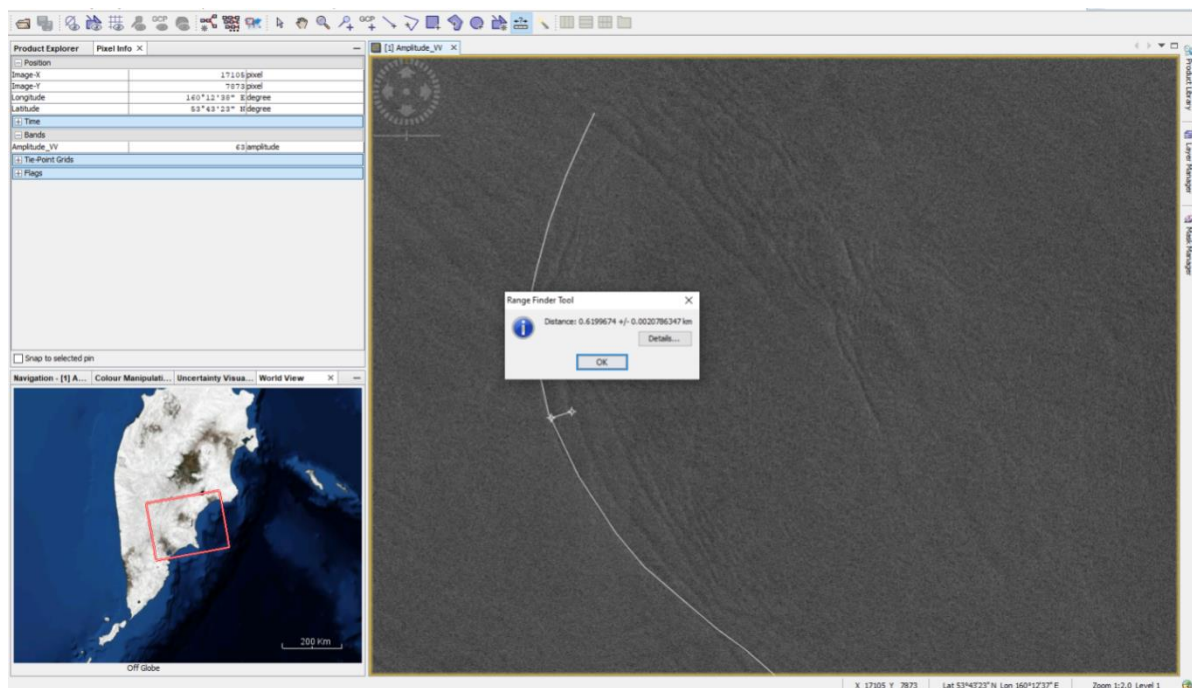


Рисунок 13. Пример определения длины волны в программном обеспечении ESASNAP

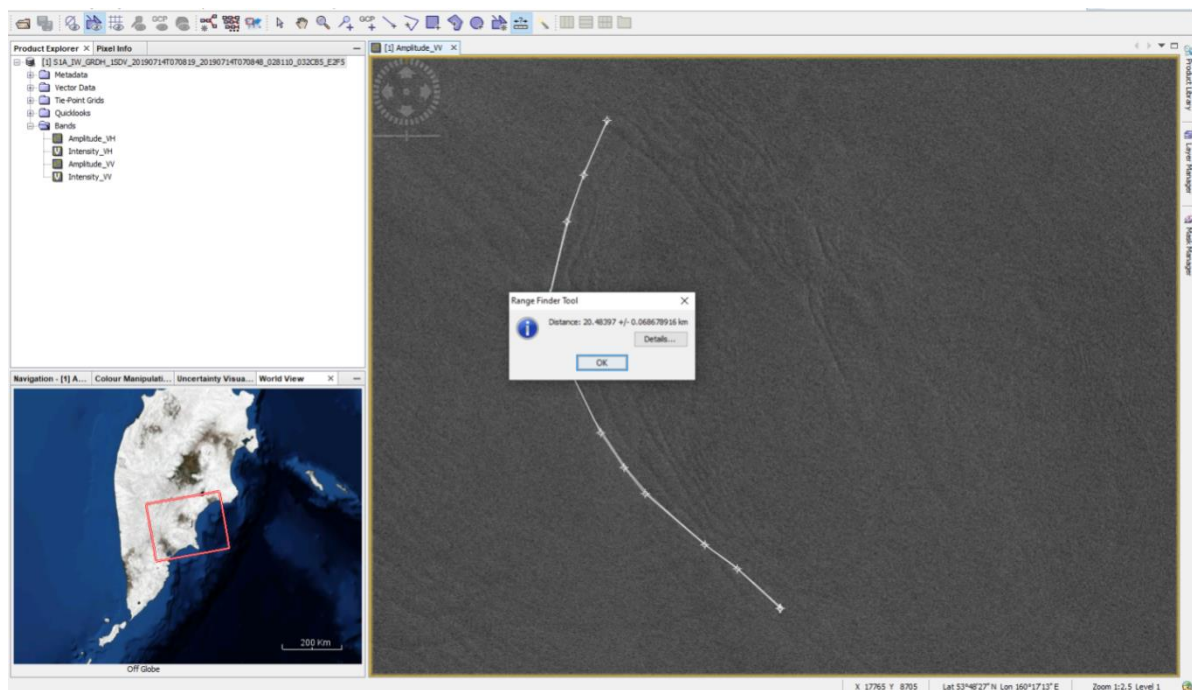


Рисунок 14. Пример определение длины лидирующего гребня в программном обеспечении ESASNAP

Глава 3. Анализ полученных результатов

3.1 Пространственно-временная изменчивость проявлений КВВ в летний период

Так как на РЛИ внутреннее волнение лучше всего проявляется в летний сезон, то логичнее начать анализ именно с него. Порядок сезонов определяется тем, на сколько хороши были условия для проявления КВВ на поверхности.

За три летних месяца было обработано 205 радиолокационных изображений и зарегистрировано 924 КВВ. Результаты зарегистрированных поверхностных проявлений внутреннего волнения показаны в таблице 4. Из рисунка 15 а) видно, что минимальное число проявлений было зарегистрировано в первой половине июня, а максимальное обнаружено во второй половине июля. За летний период были обнаружены пакеты, которые содержали от 2 до 18 волн, а среднее значение составляло 5 волн. Длины волн составили от 80 до 1900 метров, в среднем - 441 метр. Длина лидирующего гребня КВВ варьировалась от 2 до 73 км, при среднем значении 15 км. Самые интенсивные волны наблюдаются в августе, так как их средние значения таких характеристик, как количество волн в пакете и длина лидирующего гребня, которые соответственно равны 5 волн и 17 км, больше, чем в июне и в июле (таблица 5). Повторяемость характеристик всех зарегистрированных проявлений волн показана на рисунке 15.

Таблица 4 Количество зарегистрированных проявлений КВВ за летний период

Месяц	Количество волн
Июнь	289
Июль	341
Август	294
Всего	924

Таблица 5 Характеристики КВВ за летний период

Месяц	Июнь	Июль	Август	Всего
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 15	2 - 18	2 - 13	2 - 18
Среднее кол-во волн в пакете, шт	4	5	5	5
Длина волны, м	80 - 1900	110 - 1160	110 - 1500	80 - 1900
Средняя Длина волны, м	470	410	444	441
Длина лидирующего гребня, км	2 - 63	3 - 54	3 - 73	2 - 73
Средняя длина лидирующего гребня, км	13	16	17	15

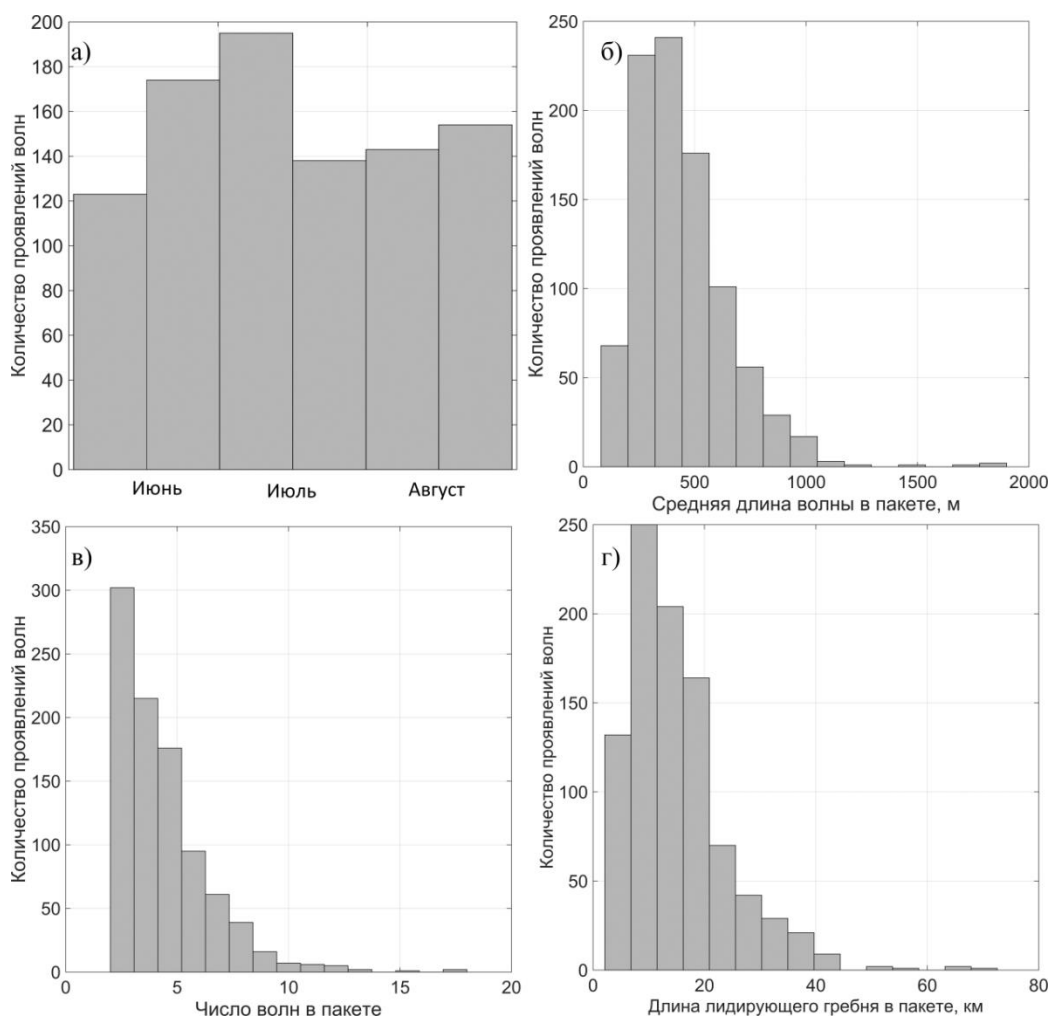


Рисунок 15. Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ, зарегистрированных за летний период: а) дат регистрации проявлений КВВ; б) средней длины волны; в) числа волн в пакете; г) длины лидирующего гребня

Рисунок 16 показывает частоту встречаемости поверхностных проявлений КВВ за летний период и можно видеть, что на протяжении трех месяцев количество проявлений и положение в пространстве довольно изменчиво. Так, в июле было выявлено максимально количество КВВ – 341, а в минимум наблюдался в июне - 289 поверхностных проявлений КВВ. Выделено четыре основных очага генерации (рис.18 г), расположенных около островов Кунашир и Зеленый, над хребтом Витязь в районе острова Онекотан, у мыса Шипунский и возле Камчатского полуострова.

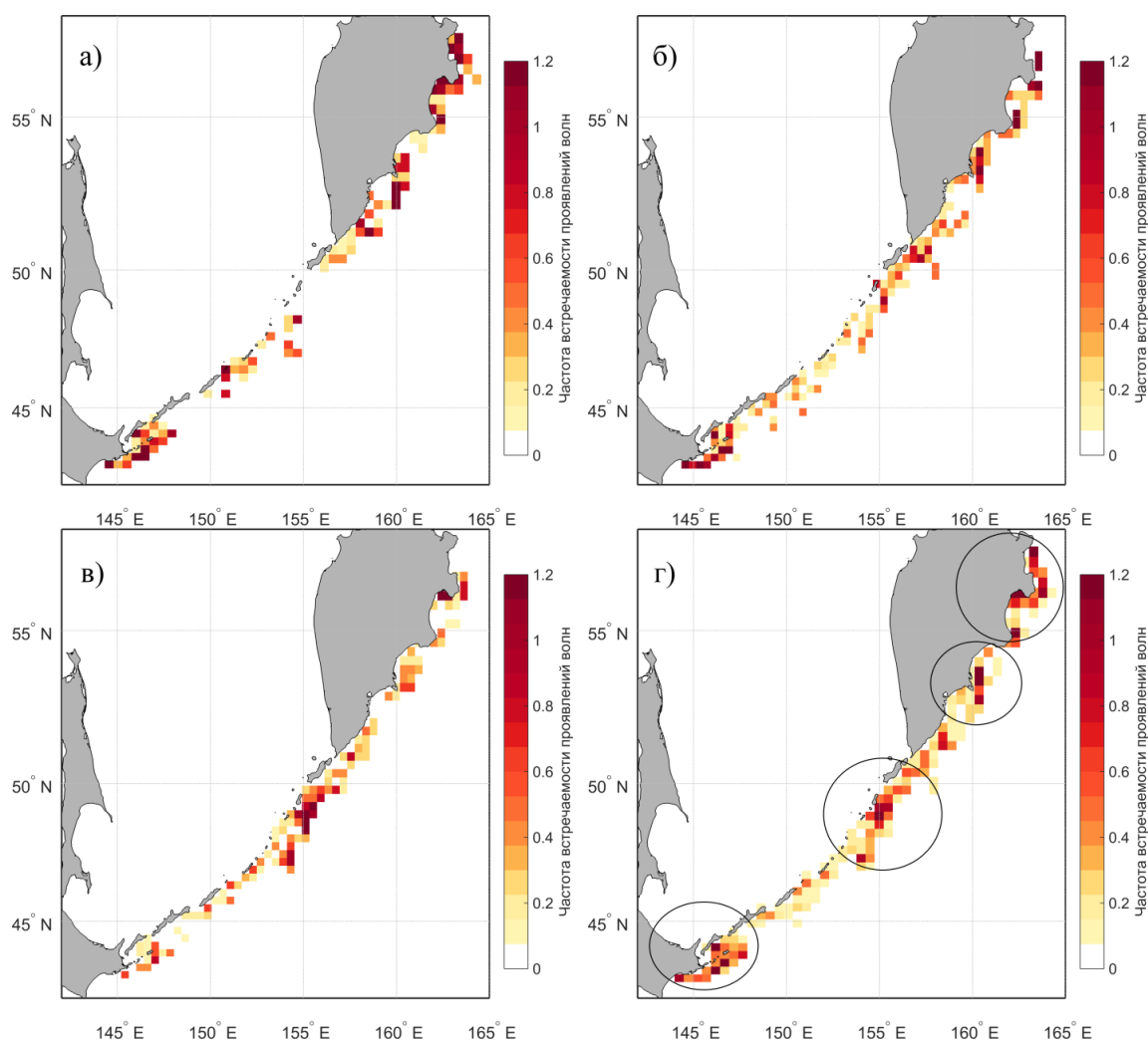


Рисунок 16. Частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ а) за июнь; б) за июль; в) за август; г) за летний период (окружностями обведено положение основных очагов генерации КВВ)

Длина лидирующего гребня и длина волны нанесены на карты, которые представлены на рисунках 17 и 18 соответственно. Величины этих характеристик распределены по пространству относительно равномерно. Так, длина лидирующего гребня в среднем по всей акватории составляет от 15 до 20 км, а длина лидирующего гребня около 500 м. Можно видеть, что максимальные длины волн и длины лидирующих гребней преимущественно наблюдаются в районах, где обнаружены очаги генерации (у острова Кунашир и острова Зеленый, в районе острова Онекотан, у мыса Шипунский, а также возле Камчатского полуострова).

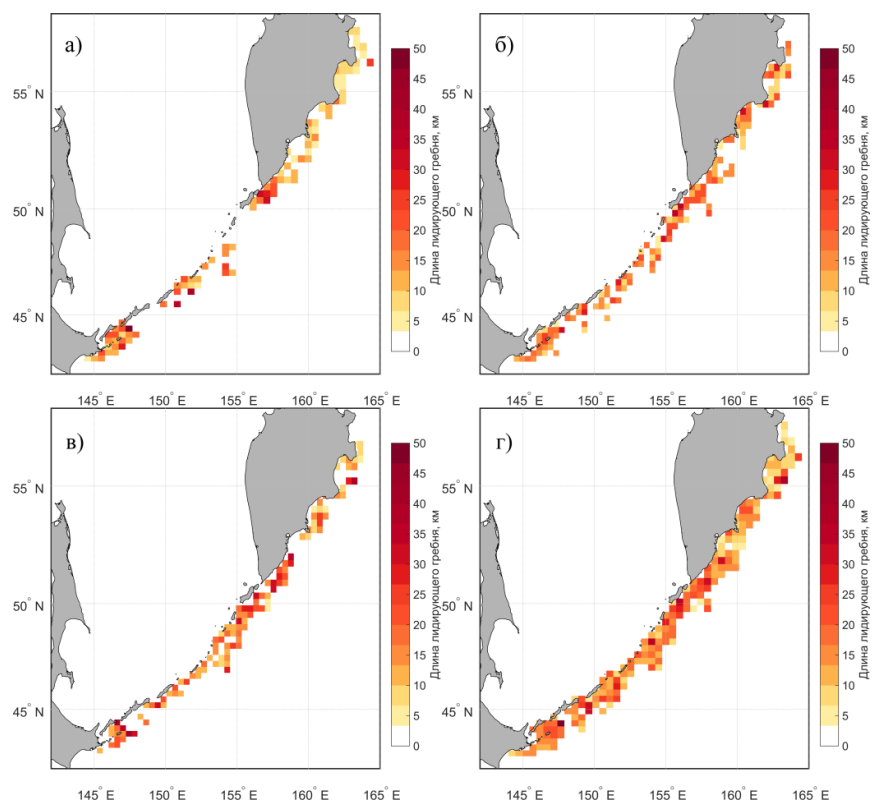


Рисунок 17. Длина лидирующего гребня а) за июнь; б) за июль; в) за август; г) за летний период

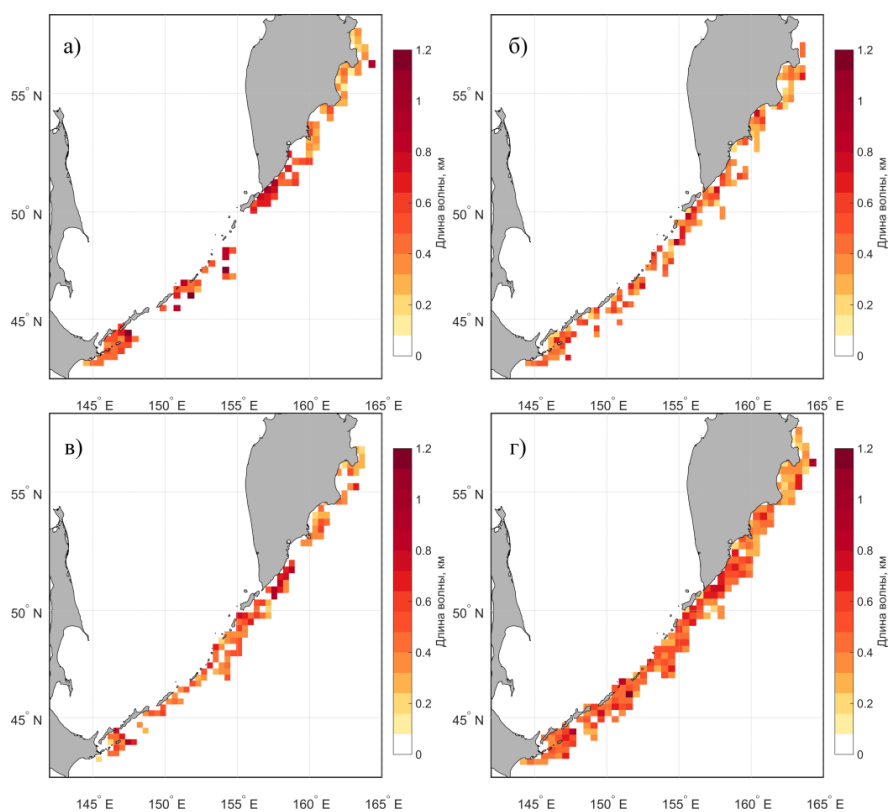


Рисунок 18. Длина волны за летний период а) за июнь; б) за июль; в) за август; г) за летний период

Была проведена оценка характеристик КВВ по трем районам за летний период (южные Курилы, северные Курилы и акватория близ полуострова Камчатка). Больше всего поверхностных проявлений было обнаружено у берегов Камчатки – 355 КВВ за летний период (таблица 6). Это может быть связано с тем, что у берегов Камчатки скорости течений намного меньше, чем в проливах Курильской гряды, где ВВ могут быстрее разрушаться. Также в проливах Курильской гряды наблюдается более однородная стратификация, что говорит о меньшем количестве поверхностных проявлений КВВ. В таблице 7 указаны все характеристики зарегистрированных КВВ по районам. В районе южных Курил выделены пакеты, содержащие от 2 до 13 волн. В среднем – 4. Длина волны составляла от 110 до 1900 м, с средним значением 462 метра, длина лидирующего гребня варьировалась от 2 до 73 км, а среднее значение составило 17 км. Пакеты, выделенные в северных Курилах, содержали 2 – 18 волн, а в среднем 5. Длина волны, измеренная в метрах, составляла от 140 до 1900, а средняя – 553. Длина лидирующего гребня изменялась от 3 до 53 км, в среднем - 18 км. Исследованный район вблизи полуострова Камчатка выявил пакеты, которые содержали в себе 2 – 18 волн, в среднем значение волн составило 5, длина волны – то 80 до 950, в среднем значение этой характеристики равнялось 376 метров. Длина лидирующего гребня изменялась в пределах от 2 до 54 км, в среднем - 12 км.

Таблица 6 Количество зарегистрированных проявлений КВВ по районам за летний период

Район	Месяц			
	Июнь	Июль	Август	Всего
Южные Курилы	109	131	69	309
Северные Курилы	28	86	146	260
Камчатка	152	124	79	355

Таблица 7 Характеристики по районам за летний период

Месяц	Июнь			Июль		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 11	2 - 12	2 - 15	2 - 11	2 - 18	2 - 18
Среднее кол-во волн в пакете, шт	4	5	4	4	5	5
Длина волны, м	210 - 1900	260 - 1900	80 - 950	140 - 980	140 - 1160	110 - 940
Средняя Длина волны, м	528	700	386	423	480	355
Длина лидирующего гребня, км	2 - 63	8 - 38	2 - 28	3 - 37	3 - 42	4 - 54
Средняя длина лидирующего гребня, км	17	18	9	15	18	14
Месяц	Август			Всего		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 13	2 - 12	2 - 10	2 - 13	2 - 18	2 - 18
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5	5	5	4	5	5
Длина волны, м	110 - 990	190 - 1500	110 - 940	110 - 1900	140 - 1900	80 - 950
Средняя Длина волны, м	434	479	388	462	553	376
Длина лидирующего гребня, км	3 - 73	4 - 53	4 - 43	2 - 73	3 - 53	2 - 54
Средняя длина лидирующего гребня, км	18	18	13	17	18	12

В летний период было выделено 924 поверхностных проявления короткопериодных внутренних волн. Преимущественно выделялись 5 - ти волновые пакеты с средними значениями длины волны в 441 метр и длины лидирующего гребня - 15 км. Выделены основные очаги генерации, в которых частота встречаемости доходила до 1.2: около островов Кунашир и Зеленый, над хребтом Витязь в районе острова Онекотан, у мыса Шипунский и возле Камчатского полуострова.

3.2 Пространственно-временная изменчивость проявлений КВВ в осенний период

223 РЛИ было обработано за осенний период и зарегистрировано 649 проявлений КВВ (таблица 8). Максимальное число КВВ было обнаружено в первой половине сентября, а минимальное - во второй половине ноября, что наглядно видно из рисунка 19 а). Были выявлены КВВ, содержащие от 2 до 16 волн, при среднем - 5 волн. Длины волн изменялись в пределах от 100 до 990 метров, а среднее значение составило 477 метров. Длина лидирующего гребня была от 3 до 85 км, а среднее - 17 км. Самые интенсивные волны выявлены в октябре, так как их среднее значение длины лидирующего гребня равно 18 км, что больше, чем в сентябре и ноябре (таблица 9). Повторяемость характеристик всех зарегистрированных проявлений волн показана на рисунке 19.

Таблица 8 Количество зарегистрированных проявлений КВВ за осенний период

Месяц	Количество волн
Сентябрь	334
Октябрь	199
Ноябрь	116
Всего	649

Таблица 9 Характеристики КВВ за осенний период

Месяц	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Всего
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 13	2 - 16	2 - 12	2 - 16
Среднее кол-во волн в пакете, шт	6	5	5	5
Длина волны, м	100 - 990	100 - 990	100 - 940	100 - 990
Средняя Длина волны, м	458	495	478	477
Длина лидирующего гребня, км	3 - 45	4 - 85	4 - 41	3 - 85
Средняя длина лидирующего гребня, км	16	18	16	17

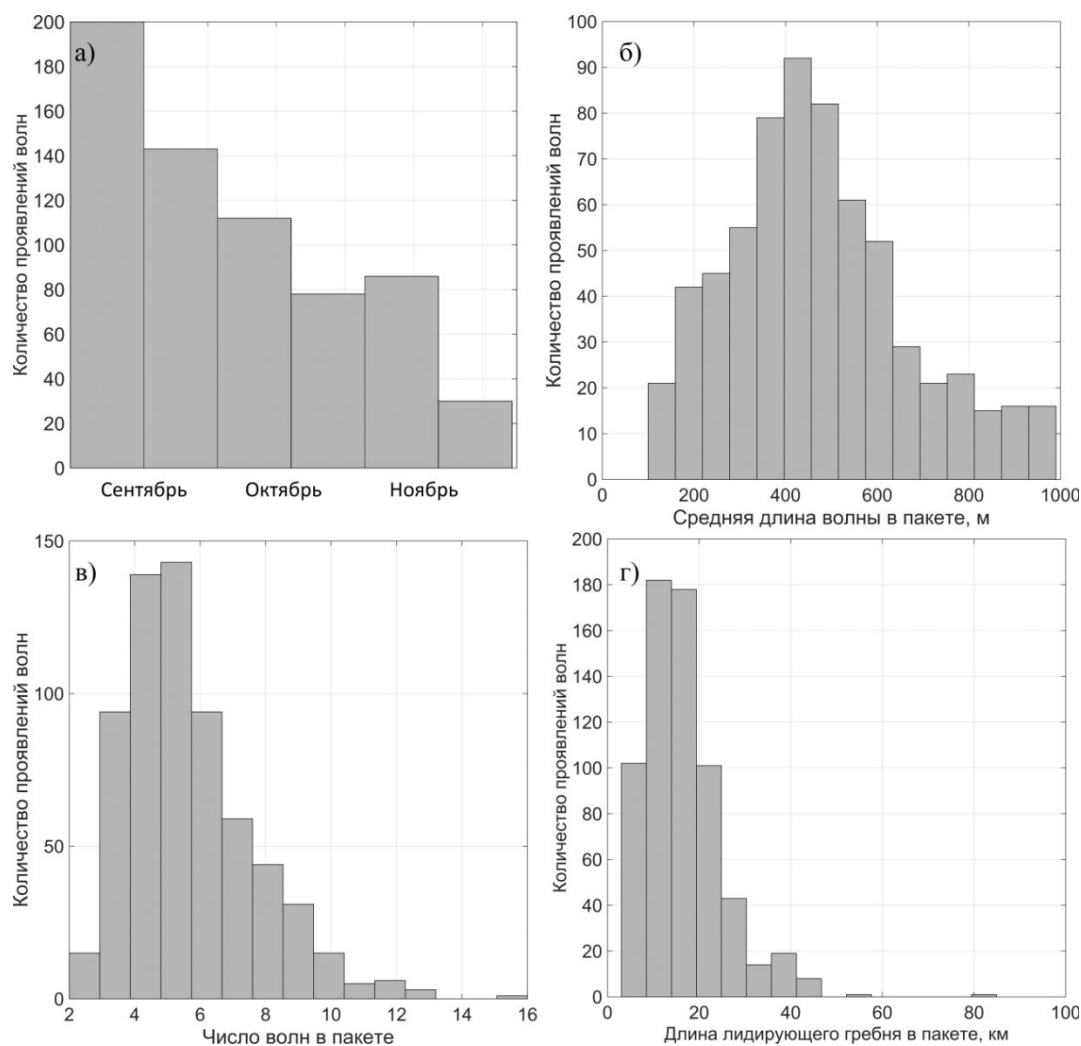


Рисунок 19. Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ, зарегистрированных за осенний период: а) дат регистрации проявлений КВВ; б) средней длины волны; в) числа волн в пакете; г) длины лидирующего гребня

На картах частоты встречаемости поверхностных проявлений КВВ за осенний период (рис.20) видно, что положение в пространстве, а также количество поверхностных проявлений КВВ непостоянно. Максимум КВВ - в сентябре, а минимум - в ноябре (таблица 8). Очаги генерации расположены у островов Кунашир и Зеленый, в районе острова Онекотан, у бухты Вестник и мыса Шипунский, а также на северо-западе Камчатского полуострова (рис.20 г). В сравнении с летним сезоном видно, что интенсивность очагов генерации уменьшилась и частота встречаемости в них уже в среднем равно 1, а не 1,2. Это может быть связано с усилением ветра и с изменением толщины ВКС, вследствие чего не все КВВ могут проявляться на поверхности.

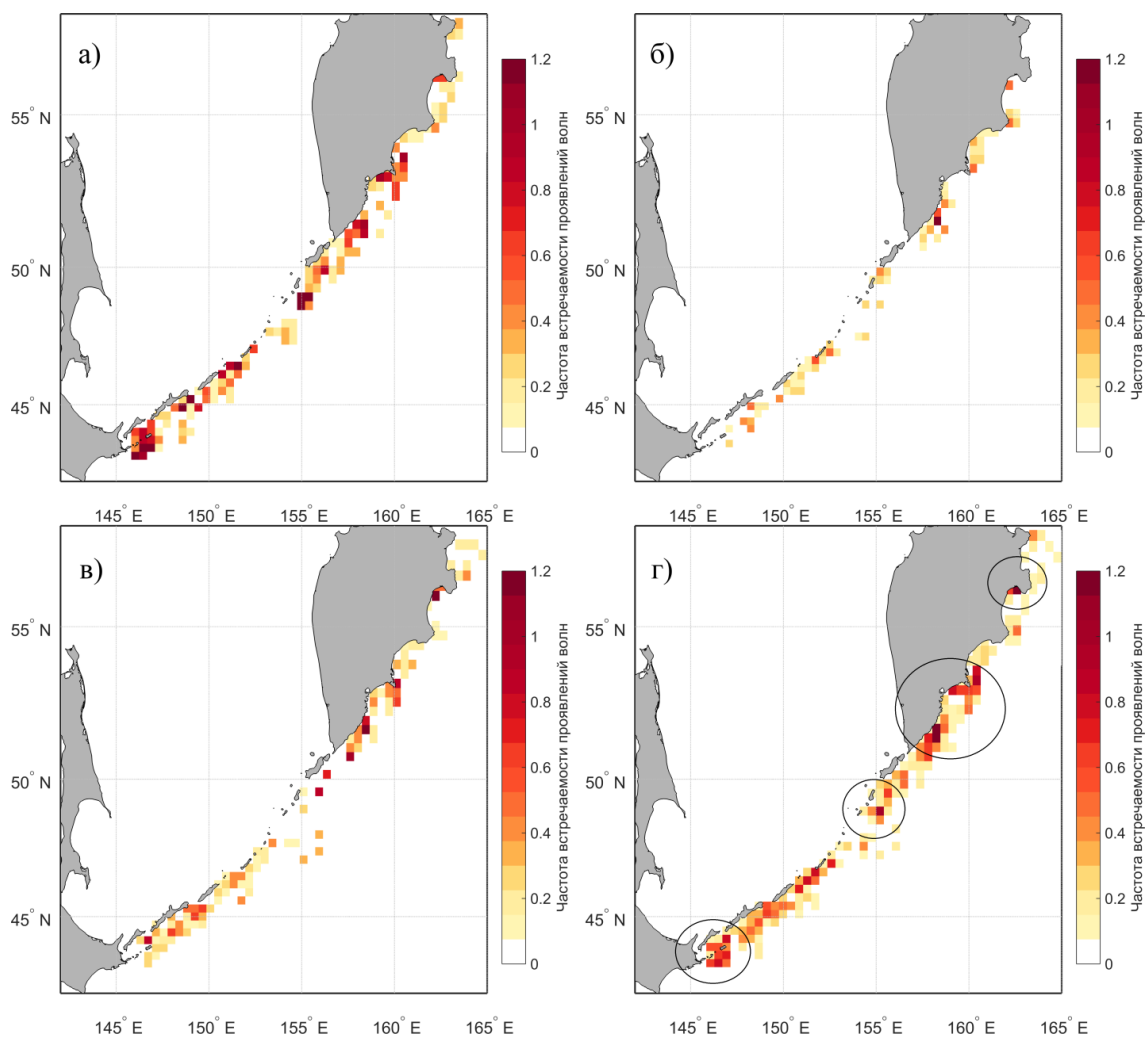


Рисунок 20. Частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ а) за сентябрь; б) за октябрь; в) за ноябрь; г) за осенний период (окружностями обведено положение основных очагов генерации КВВ)

На рисунках 21 и 22 наглядно показаны карты длины лидирующего гребня и длина волны. Пакеты с максимальными длинами лидирующего гребня, которые составляют от 40 км и выше преимущественно располагаются в районе острова Итуруп. Длины волн по всей акватории распределены равномерно, но есть зависимость от очагов генерации, то есть в зафиксированных очагах генерации пакеты с большими длинами волн встречаются гораздо чаще, чем за их пределами.

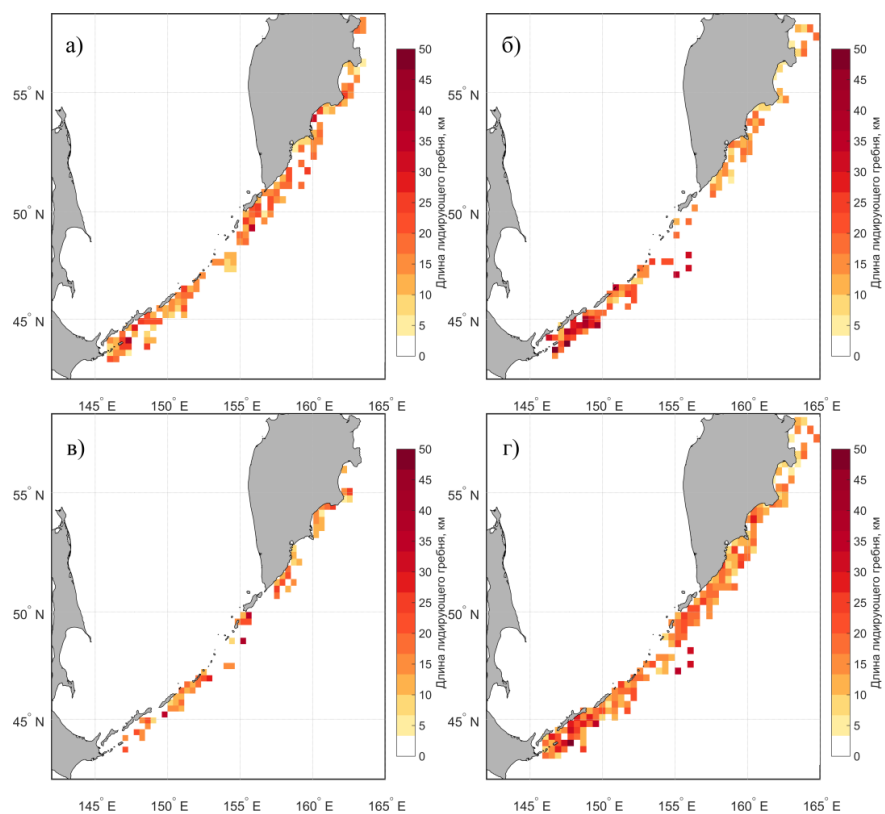


Рисунок 21. Длина лидирующего гребня а) за сентябрь; б) за октябрь; в) за ноябрь; г) за осенний период

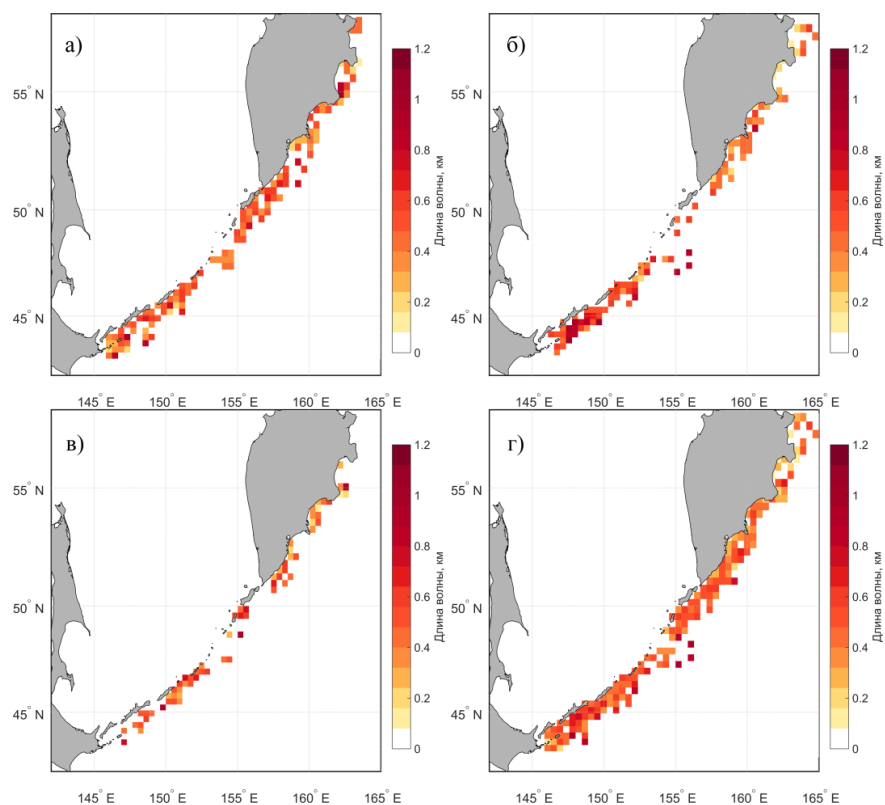


Рисунок 22. Длина волны а) за сентябрь; б) за октябрь; в) за ноябрь; г) за осенний период

Как видно из таблицы 10 больше всего КВВ (282) за осенний период было обнаружено в районе Южных Курил. В таблице 11 представлены значения всех снятых характеристик КВВ по трем районам. Так, в области южных Курил количество волн в пакете составляло от 2 до 16, а в среднем – 6. Длина волны наблюдалась в пределах 110 – 990 метров (среднее 510 метров). Длина лидирующего гребня изменялась от 4 до 85 км, а в среднем значение составляло 18 км. В северных Курилах пакеты КВВ содержали 2 – 13 волн, со средним значением 5. Длина волны в этом районе была от 140 до 980 метров (среднее 539 метров), а длина лидирующего гребня 5 – 41 км, в среднем – 19 км. У полуострова Камчатка пакеты содержали в себе от 2 до 13 волн, в среднем – 5. Длины волн составляли 100 – 990 метров (среднее 412 метров). Длина лидирующего гребня здесь менялась от 3 до 39 км, а в среднем составляла 14 км. Сравнивая осенний и летний периоды можно сделать вывод о том, что в целом за летний период было обнаружено больше волн в каждом районе. Но осенью в районе южных Курил наблюдались волны, у которых средние значения характеристик были больше, чем летом (средние значения количества волн в пакете было больше на 2, а длина волны превышала на 48 метров).

Таблица 10 Количество зарегистрированных проявлений КВВ по районам за осенний период

Район	Месяц			
	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Всего
Южные Курилы	148	89	45	282
Северные Курилы	77	31	22	130
Камчатка	109	79	49	237

Таблица 11 Характеристики по районам за осенний период

Месяц	Сентябрь			Октябрь		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 13	2 - 13	2 - 13	2 - 16	2 - 10	2 - 11
Среднее кол-во волн в пакете, шт	6	6	5	6	5	5
Длина волны, м	110 - 990	140 - 980	100 - 990	190 - 990	170 - 950	100 - 930
Средняя Длина волны, м	452	493	441	568	569	382
Длина лидирующего гребня, км	4 - 45	5 - 41	3 - 39	6 - 85	8 - 35	4 - 28
Средняя длина лидирующего гребня, км	16	17	14	22	19	12
Месяц	Ноябрь			Всего		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 12	3 - 8	2 - 10	2 - 16	2 - 13	2 - 13
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5	5	5	6	5	5
Длина волны, м	240 - 940	290 - 930	100 - 930	110 - 990	140 - 980	100 - 990
Средняя Длина волны, м	509	556	413	510	539	412
Длина лидирующего гребня, км	5 - 41	8 - 41	4 - 32	4 - 85	5 - 41	3 - 39
Средняя длина лидирующего гребня, км	16	21	15	18	19	14

В осенний период зарегистрировано 649 КВВ. В течении сезона выделялись пакеты, содержащие в среднем 5 волн. Длина волны и длина лидирующего гребня составляли около 477 метров и 17 км соответственно. Очаги генерации были выделены у островов Кунашир и Зеленый, в районе острова Онекотан, у бухты Вестник и мыса Шипунский, а также на северо-западе Камчатского полуострова. В этих районах частота встречаемости в основном превышает 1.

3.3 Пространственно-временная изменчивость проявлений КВВ в весенний период

За весну скачено 195 РЛИ, на которых было выявлено 255 КВВ, как видно из таблицы 12. Минимальное число проявлений обнаружено в марте, а максимальное – во второй половине мая (рис.23 а)). Были обнаружены пакеты, которые содержали от 3 до 12 волн, в среднем - 5 волн. Длины волн составляли от 120 до 980 метров, при среднем значении 509 метров. Длина лидирующего гребня КВВ варьировалась от 3 до 45 км, в среднем составляла 17 км. В марте выявлены самые интенсивные волны, так как их средние значения длины лидирующего гребня составляет 21 км, что значительно больше, чем в апреле и мае (таблица 12). Повторяемость характеристик всех зарегистрированных проявлений волн показана на рисунке 23.

Таблица 12 Количество зарегистрированных проявлений КВВ за весенний период

Месяц	Количество волн
Март	14
Февраль	56
Май	185
Всего	255

Таблица 13 Характеристики КВВ за весенний период

Месяц	Март	Апрель	Май	Всего
Кол-во волн в пакете, шт	3 - 6	3 - 8	3 - 12	3 - 12
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5	5	6	5
Длина волны, м	370 - 920	220 - 930	120 - 980	120 - 980
Средняя Длина волны, м	646	466	416	509
Длина лидирующего гребня, км	7 - 39	7 - 45	3 - 35	3 - 45
Средняя длина лидирующего гребня, км	21	16	14	17

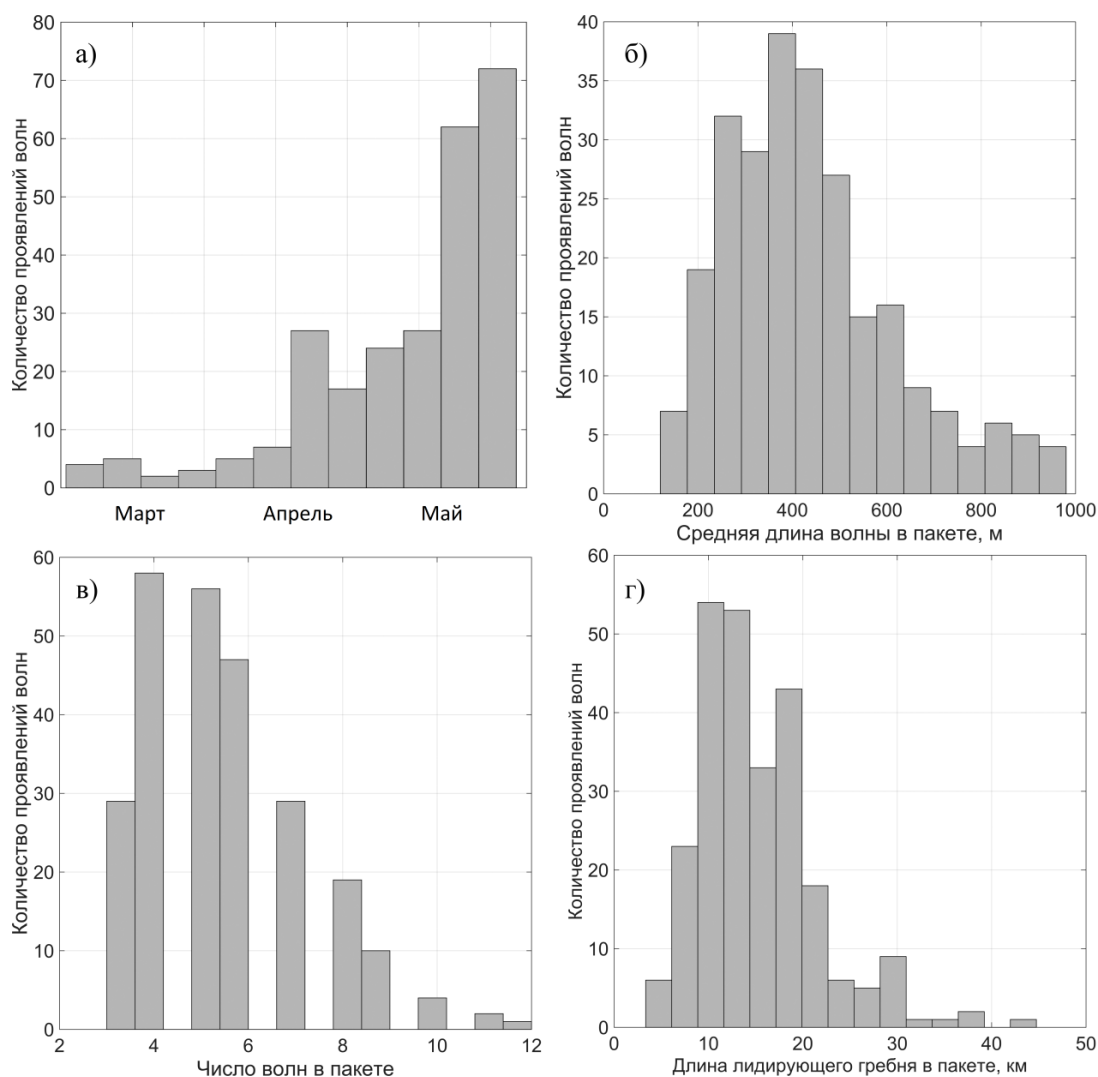


Рисунок 23. Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ, зарегистрированных за весенний период: а) дат регистрации проявлений КВВ; б) средней длины волны; в) числа волн в пакете; г) длины лидирующего гребня

Частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ за весенний период показана на рисунке 24. Можно наблюдать, что положение в пространстве, а также количество поверхностных проявлений внутреннего волнения в течении всей весны непостоянно. Наглядно видно, что в марте самое минимальное количество КВВ, а в мае - максимальное. Было выделено три очага генерации (рис.24 г). Во - первых, в районе острова Кунашир и острова Зеленый, во - вторых, у мыса Шипунский в Кроноцком заливе и, в - третьих, около Камчатского полуострова. По сравнению с летним и осенними периодами видно, что очаги генерации уже не так отчетливо выделяются. В районе острова Онекотан, а также у бухты Вестник, где до этого частота встречаемости проявлений КВВ составляла около 1, то в весенний период в этих областях она уже равняется около 0,2. Это говорит о том, что весной

еще дует сильный ветер и большая глубина перемешанного слоя не дают возможности КВВ проявляться на радиолокационных изображениях.

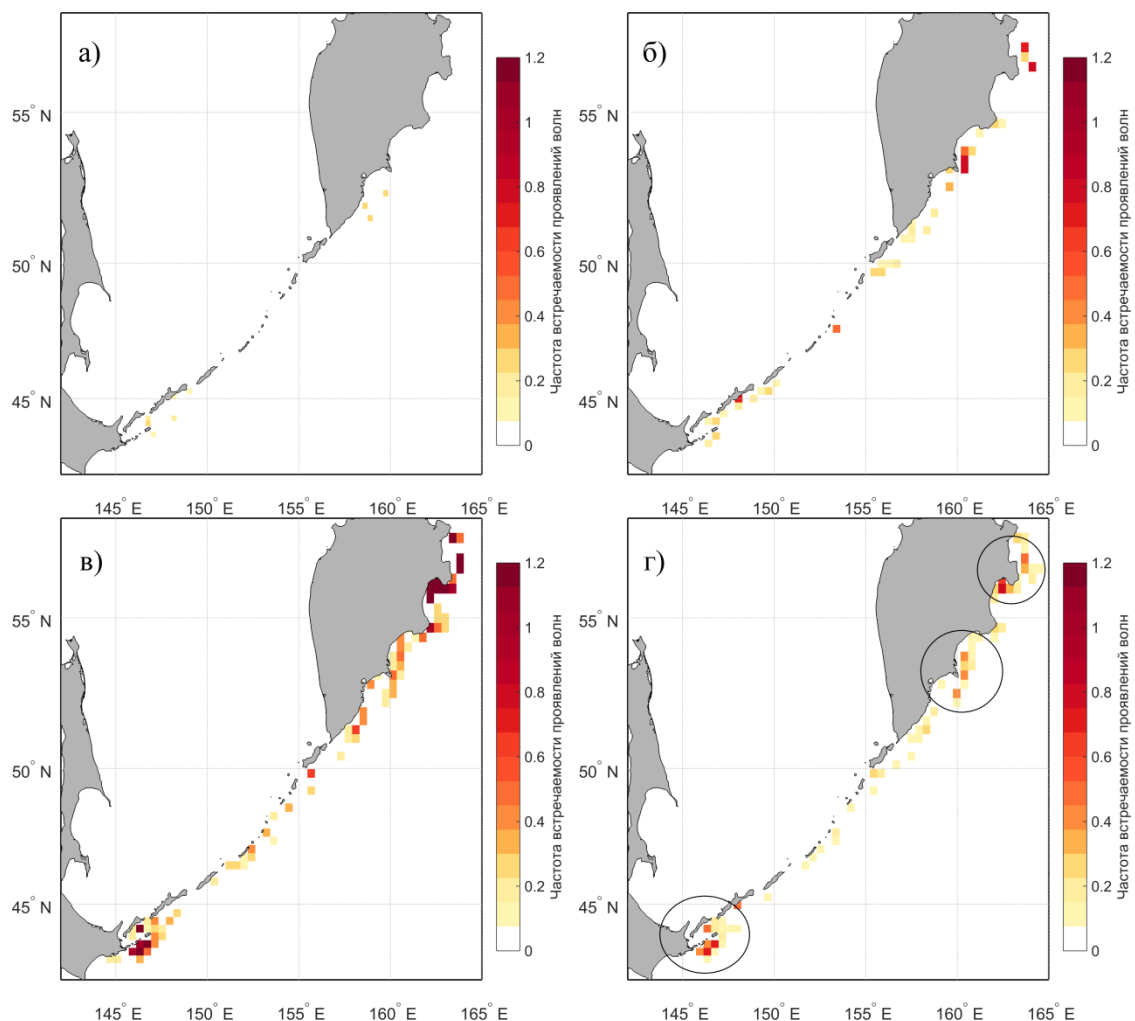


Рисунок 24. Частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ а) за март; б) за апрель; в) за май; г) за весенний период (окружностями обведено положение основных очагов генерации КВВ)

Карта длин лидирующего гребня показана на рисунке 25 и в целом пространственное распределение равномерное, но можно выделить районы возле островов Итуруп и Кунашир и область в районе бухты Вестник, где в среднем длины волн превышают 25 км. Длины волн за весенний период наглядно показаны на рисунке 26. Здесь можно выделить районы в области островов Кунашир и Итуруп, а также вблизи острова Онекотан и у бухты Вестник, где длины волн составляют в среднем около 700 м.

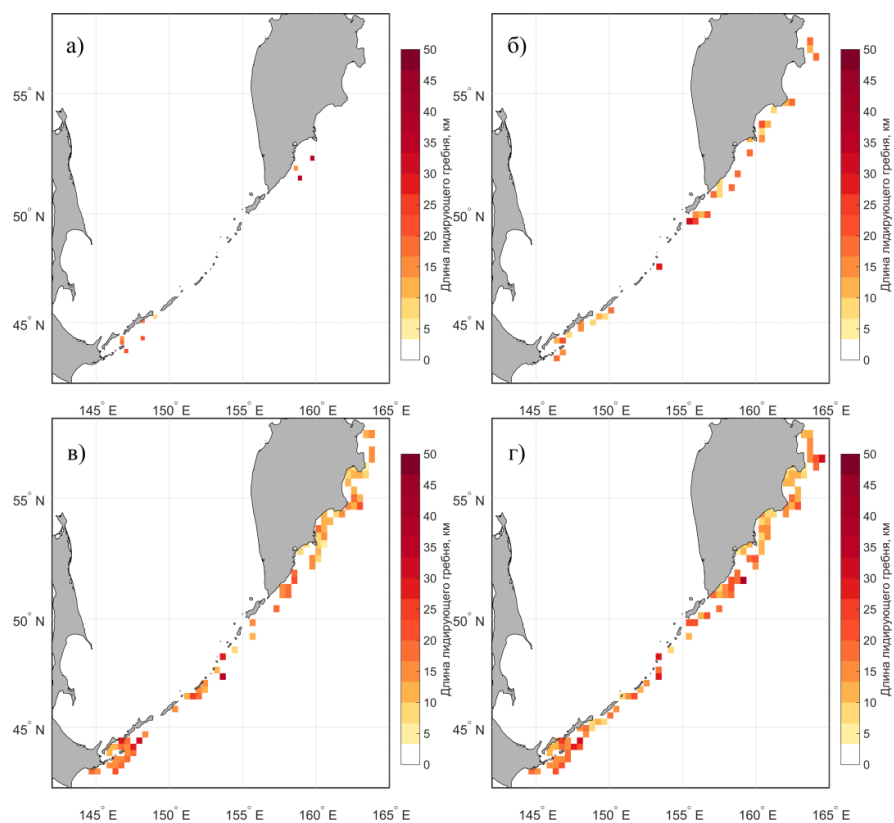


Рисунок 25. Длина лидирующего гребня а) за март; б) за апрель; в) за май; г) за
весенний период

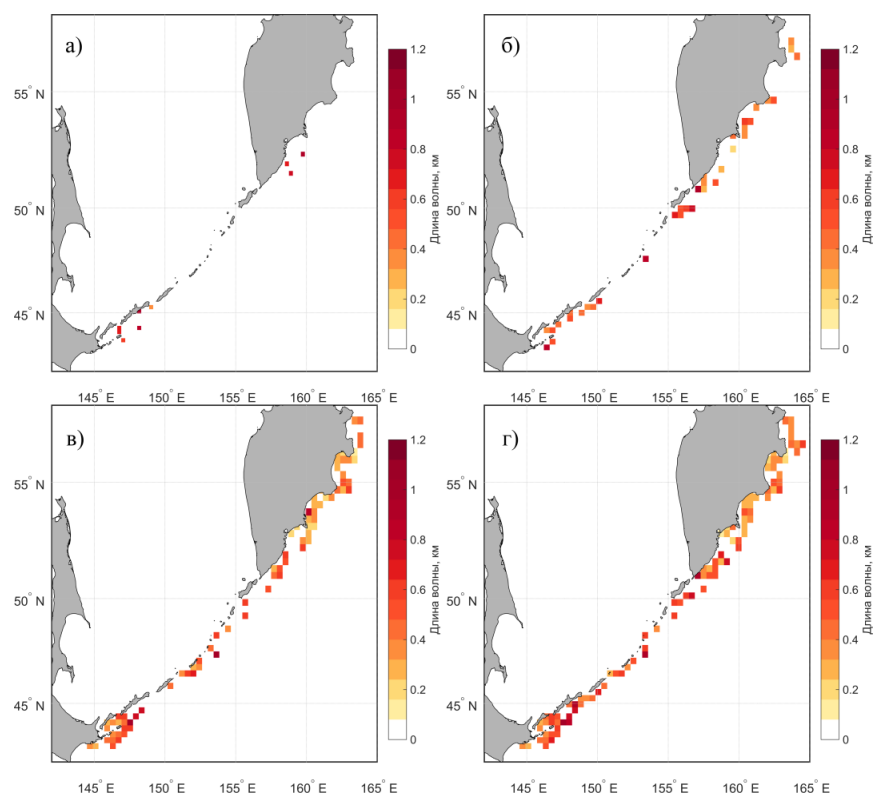


Рисунок 26. Длина волны за весенний период а) за март; б) за апрель; в) за май; г) за
весенний период

Таблица 14 показывает количество КВВ, зарегистрированное в трех районах исследуемой акватории (южные Курилы, северные Курилы, район полуострова Камчатка). Так, за весенний период больше всего волн зарегистрировано в мае у Берегов Камчатки, а также в целом за сезон у Камчатки зафиксировано максимальное количество проявлений внутреннего волнения. Значения основных характеристик КВВ отражены в таблице 15. За весенний период в районе южных Курил были выявлены пакеты с содержанием волн от 3 до 12, в среднем – 5. Длина волны составляла от 140 до 970 метров (среднее 528 метров). Длина лидирующего гребня изменялась от 6 до 31 км, а среднее значение составило 16 км. Пакеты в области северных Курил содержали от 3 до 8 волн, а в среднем – 5. Длина волны 250 – 980 метров, со средним значением 601 метр. Длины лидирующих гребней в данном районе варьировались в пределах от 8 до 45 км, а в среднем равнялись 20 км. У берегов полуострова Камчатка обнаруживались поверхностные проявления КВВ, содержащие от 3 до 11 волн, в среднем – 5. Длина волны здесь составляла от 120 до 920 м (средне 463 метра). Длина лидирующего гребня менялась от 3 до 39 км, а в среднем составляла 8 км. В сравнении с летним периодом здесь наблюдались волны с большими значениями длин волн по всем районам, количество волн в пакете везде в среднем около 5, а длина лидирующего гребня в районе южных и северных Курил сопоставимо равна, а у берегов Камчатки в летний период наблюдались длины лидирующих гребней, которые в среднем были больше на 4 км, чем в весенний.

Таблица 14 Количество зарегистрированных проявлений КВВ по районам за весенний период

Район	Месяц			
	Март	Апрель	Май	Всего
Южные Курилы	9	17	84	110
Северные Курилы	0	11	14	25
Камчатка	5	28	87	120

Таблица 15 Характеристики по районам за весенний период

Месяц	Март			Апрель		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	3 - 6	нет	3 - 6	3 - 8	3 - 8	3 - 8
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5	нет	5	5	5	5
Длина волны, м	370 - 890	нет	390 - 920	350 - 850	250 - 930	220 - 750
Средняя Длина волны, м	647	нет	646	484	642	387
Длина лидирующего гребня, км	9 - 24	нет	15 - 39	7 - 25	8 - 45	7 - 27
Средняя длина лидирующего гребня, км	18	нет	25	15	23	15
Месяц	Май			Всего		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	3 - 12	3 - 6	3 - 11	3 - 12	3 - 8	3 - 11
Среднее кол-во волн в пакете, шт	6	5	6	5	5	5
Длина волны, м	140 - 970	290 - 980	120 - 840	140 - 970	250 - 980	120 - 920
Средняя Длина волны, м	453	559	357	528	601	463
Длина лидирующего гребня, км	6 - 31	8 - 35	3 - 31	6 - 31	8 - 45	3 - 39
Средняя длина лидирующего гребня, км	16	17	13	16	20	18

В весенний период обнаружено 255 проявлений КВВ. Были выделены пакеты, которые в среднем содержат 5 волн. Длина волны у зарегистрированных КВВ составляла около 509 метров. Значение длина лидирующего гребня в среднем было 17 км. За данный период очаги генерации уже не так отчетливо выделяются, как за лето и осень, но все же основные три можно выделить, где частота встречаемости не меньше 0,6. Во - первых, вблизи островов Кунашир Зеленый, во - вторых, в районе мыса Шипунский в Кроноцком заливе и в – третьих, район около Камчатского полуострова.

3.4 Пространственно-временная изменчивость проявлений КВВ в зимний период

За зимний период было рассмотрено 204 РЛИ, на которых было зарегистрировано 47 проявлений КВВ (таблица 16). Минимальное число проявлений было зарегистрировано в феврале, а максимальное – в декабре. На снимках обнаруживались пакеты, содержащие от 3 до 10 волн, в среднем - 6 волн. Длины волн внутри пакета варьировали от 140 до 960 метров, при среднем значении в 575 метров. Фронт лидирующего гребня цуга волн составлял от 4 до 45 км, в среднем 20 км. В январе наблюдаются самые интенсивные волны, так как их средние значения таких характеристик, как количество волн в пакете и длина лидирующего гребня, которые соответственно равны 6 волн и 28 км, больше, чем в декабре и феврале (таблица 17). Повторяемость характеристик всех зарегистрированных проявлений волн показана на рисунке 27.

Таблица 16 Количество зарегистрированных проявлений КВВ за зимний период

Месяц	Количество волн
Декабрь	30
Январь	11
Февраль	6
Всего	47

Таблица 17 Характеристики КВВ за зимний период

Месяц	Декабрь	Январь	Февраль	Всего
Кол-во волн в пакете, шт	3 - 10	3 - 9	3 - 8	3 - 10
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5	6	6	6
Длина волны, м	140 - 960	410 - 920	250 - 880	140 - 960
Средняя Длина волны, м	552	721	452	575
Длина лидирующего гребня, км	4 - 37	17 - 45	8 - 28	4 - 45
Средняя длина лидирующего гребня, км	18	28	15	20

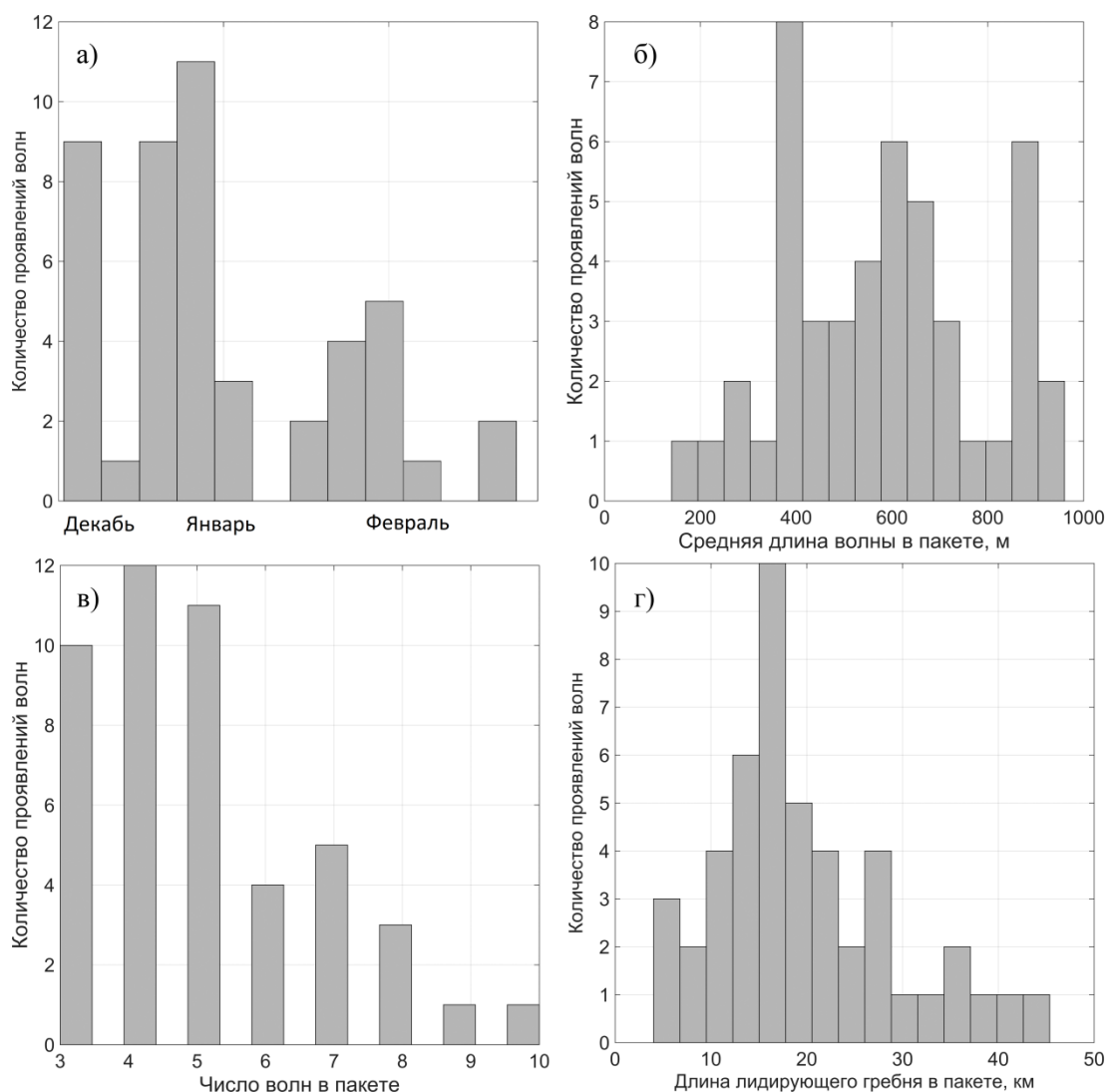


Рисунок 27. Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ, зарегистрированных за зимний период: а) дат регистрации проявлений КВВ; б) средней длины волны; в) числа волн в пакете; г) длины лидирующего гребня

На рисунке 28 показана частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ. Видно, что пространственное положение и количество проявлений КВВ непостоянно в течение зимнего периода. Минимальное число проявлений зарегистрировано в феврале, а максимальное в декабре. За зимний период можно выделить два основных очага генерации, которые выделены окружностями на рисунке 28 г). Первый - около мыса Шипунский в Кроноцком заливе, а второй находится в районе Камчатского полуострова.

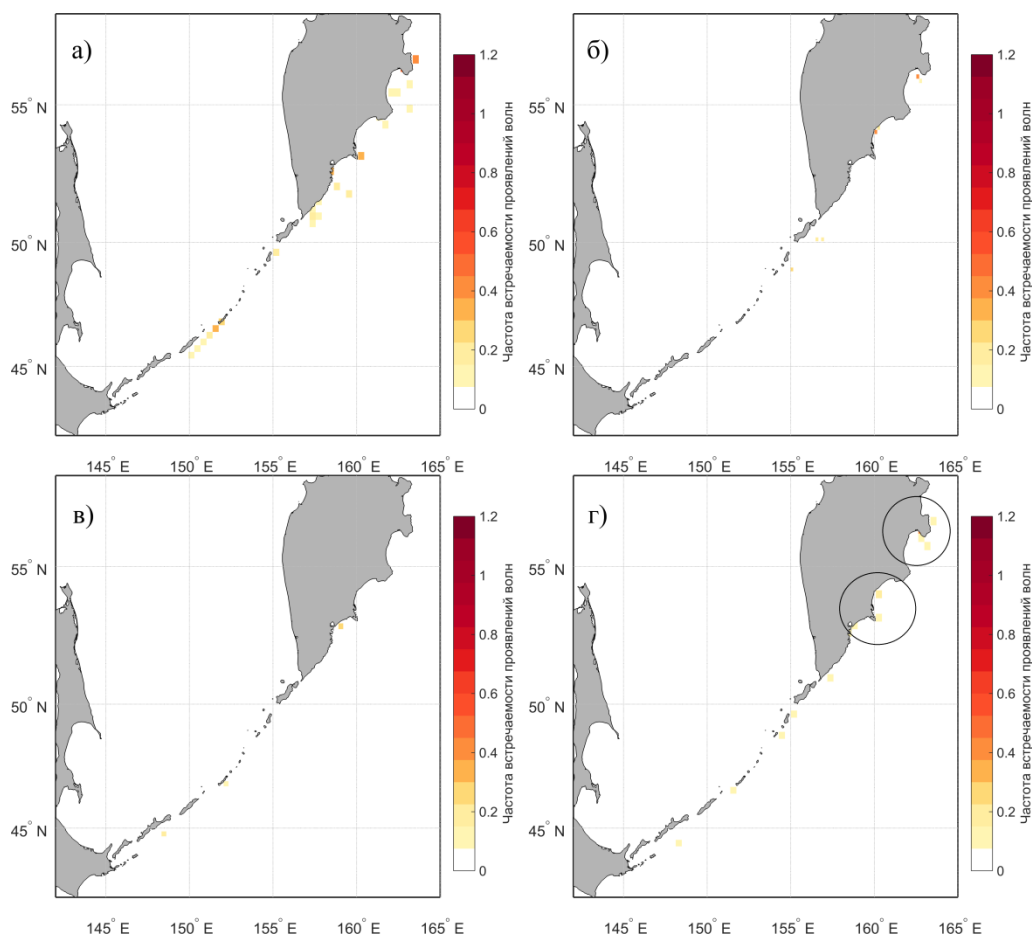


Рисунок 28. Частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ а) за декабрь; б) за январь; в) за февраль; г) за зимний период (окружностями обведено положение основных очагов генерации КВВ)

Длина лидирующего гребня и длина волны нанесены и наглядно показаны на картах, которые представлена на рисунках 29 и 30 соответственно. В зимний период поверхностные проявления КВВ регистрировались редко и не повсеместно, в отличие от летнего периода, где волн выделено много и на всей исследуемой акватории. Поэтому можно выделить только два района большей встречаемости волн как с максимальной длиной волны, так и длиной лидирующего гребня. Такими районами является область возле Камчатского полуострова и район вблизи острова Парамушир. Они обозначены кругами на рисунке 28 г.

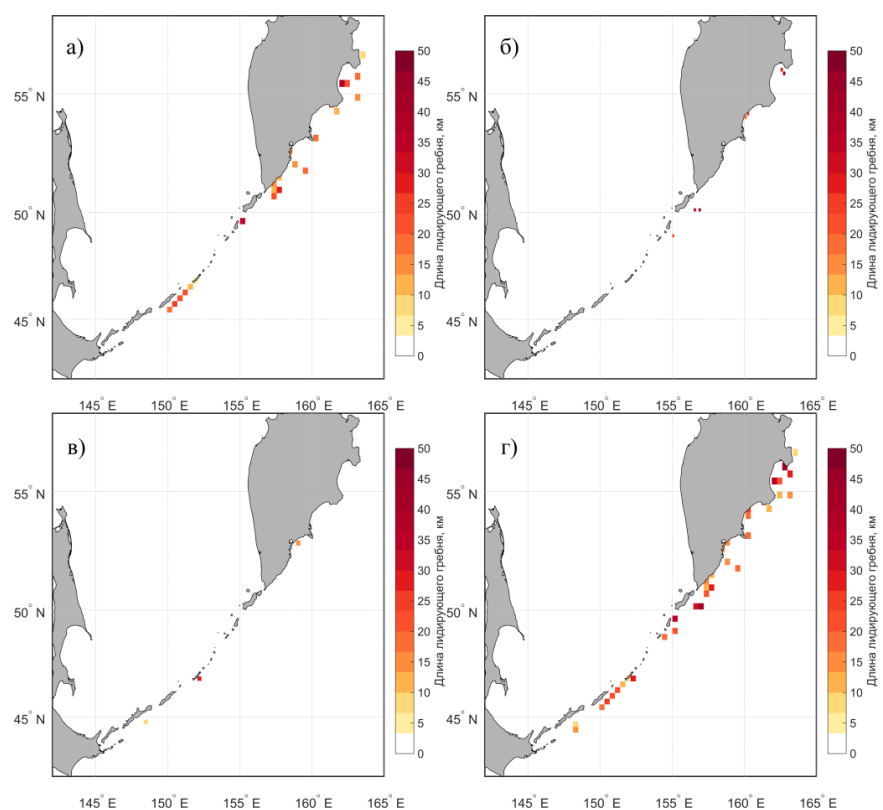


Рисунок 29. Длина лидирующего гребня а) за декабрь; б) за январь; в) за февраль; г) за зимний период

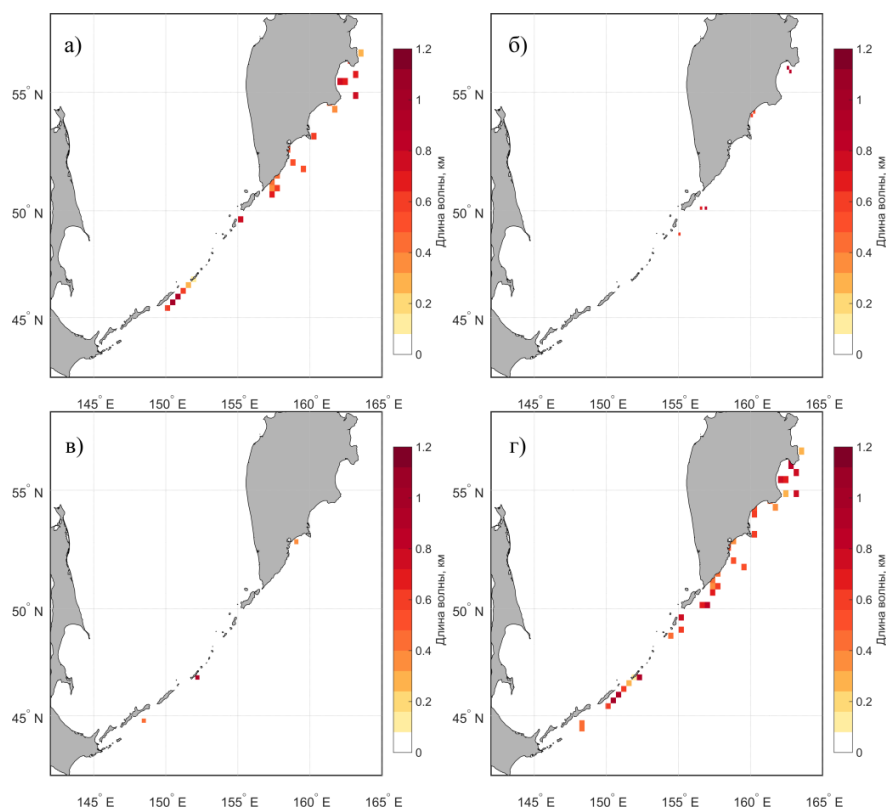


Рисунок 30. Длина волны за зимний период а) за декабрь; б) за январь; в) за февраль; г) за зимний период

За зимний период самое большое количество зарегистрированных поверхностных проявлений КВВ было обнаружено в декабре в районе Камчатки (27), как показывает таблица 18. Характеристики по районам за зимний период представлены в таблице 19. В области южных Курил наблюдались пакеты, которые содержали от 3 до 8 волн, в среднем значение волн составило 6. Длина волны выявлена в пределах от 140 до 960 метров, со средним значением 547 метров. Длина лидирующего гребня от 4 до 28 км (среднее 16 км). На севере Курил поверхностные проявления состояли минимум из 3, а максимум из 10 волн, а в среднем из 6. Длина волны менялась от 410 до 890 метров (среднее 674 метра), длина лидирующего гребня варьировалась от 20 до 42 км, в среднем – 29 км. За зиму в районе Полуострова Камчатка выявлены пакеты, которые содержат от 3 до 9 волн, при среднем значении 5. Длина волны в метрах выявлена от 250 до 920 метров (среднее 524 метра). Длина лидирующего гребня от 5 до 45 км, а среднее значение этой характеристики составило 19 км. В целом за зиму во всех районах было выделено намного меньше проявлений КВВ, чем в другие периоды. Так, зимой было зарегистрировано на 877 КВВ меньше, чем летом. Однако, по интенсивности волны, выделенные зимой, больше, чем в летний период, так как в каждом из трех рассматриваемых районах длина волны и количество волн в пакете превышают значения, которые зафиксированы в летний период. Так как зимой в данной районе плохие погодные условия и преобладают сильные ветра, а глубина перемешанного слоя составляет в это время максимальные значения, то на поверхности могут проявляться только КВВ, у которых довольно большие значения длины волны.

Таблица 18 Количество зарегистрированных проявлений КВВ по районам за зимний период

Район	Месяц			
	Декабрь	Январь	Февраль	Всего
Южные Курилы	8	0	4	12
Северные Курилы	4	4	0	8
Камчатка	18	7	2	27

Таблица 19 Характеристики по районам за зимний период

Месяц	Декабрь			Январь		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	3 - 8	5 - 10	3 - 5	нет	3 - 5	4 - 9
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5	7	4	нет	4	7
Длина волны, м	140 - 960	620 - 890	260 - 760	нет	410 - 860	550 - 920
Средняя Длина волны, м	563	695	516	нет	653	760
Длина лидирующего гребня, км	4 - 26	20 - 35	5 - 37	нет	20 - 42	17 - 45
Средняя длина лидирующего гребня, км	16	26	16	нет	29	28
Месяц	Февраль			Всего		
Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	5 - 8	нет	3 - 5	3 - 8	3 - 10	3 - 9
Среднее кол-во волн в пакете, шт	6	нет	4	6	6	5
Длина волны, м	370 - 880	нет	250 - 340	140 - 960	410 - 890	250 - 920
Средняя Длина волны, м	530	нет	295	547	674	524
Длина лидирующего гребня, км	8 - 28	нет	11 - 13	4 - 28	20 - 42	5 - 45
Средняя длина лидирующего гребня, км	16	нет	13	16	29	19

В зимний период было зарегистрировано всего 47 КВВ. Обнаруживались преимущественно 6 - ти волновые пакеты. Длина волны у этих проявлений в среднем составляла 575 метров, а длина лидирующего гребня - 20 км. За данный период плохо выделяются очаги генерации, так как сами КВВ плохо проявляются на поверхности. Так, можно выделить два основных, где частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ равняется около 0,3, которыми являются район возле мыса Шипунский в Кроноцком заливе и область у Камчатского полуострова.

3.5 Особенности проявлений КВВ на рассматриваемой акватории в целом за год

За весь исследуемый период (01.12.2018-30.11.2019 гг.) было обработано 827 РЛИ на которых зарегистрировано 1875 поверхностных проявлений КВВ, что видно из таблицы 20. Максимальное число КВВ было выявлено в летний период (в июле), а минимальное - в зимний (в феврале), что наглядно можно видеть на рисунке 31 а). Короткопериодные внутренние волны содержали от 2 до 18 волн, а в среднем значение составило 5 волн. Длины волн варьировались в пределах от 80 до 1900 метров, при среднем - 501 метр. Длина лидирующего гребня менялась от 2 до 85 км, а среднее значение составляло 17 км. Повторяемость характеристик всех зарегистрированных проявлений волн наглядно показана на рисунке 31.

Таблица 20 Количество зарегистрированных проявлений КВВ за весь период

Сезон	Количество волн
Лето	924
Осень	649
Зима	47
Весна	255
Всего	1875

Таблица 21 Характеристики КВВ за весь период

Период	Декабрь 2018 - ноябрь 2019
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 18
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5
Длина волны, м	80 - 1900
Средняя Длина волны, м	501
Длина лидирующего гребня, км	2 - 85
Средняя длина лидирующего гребня, км	17

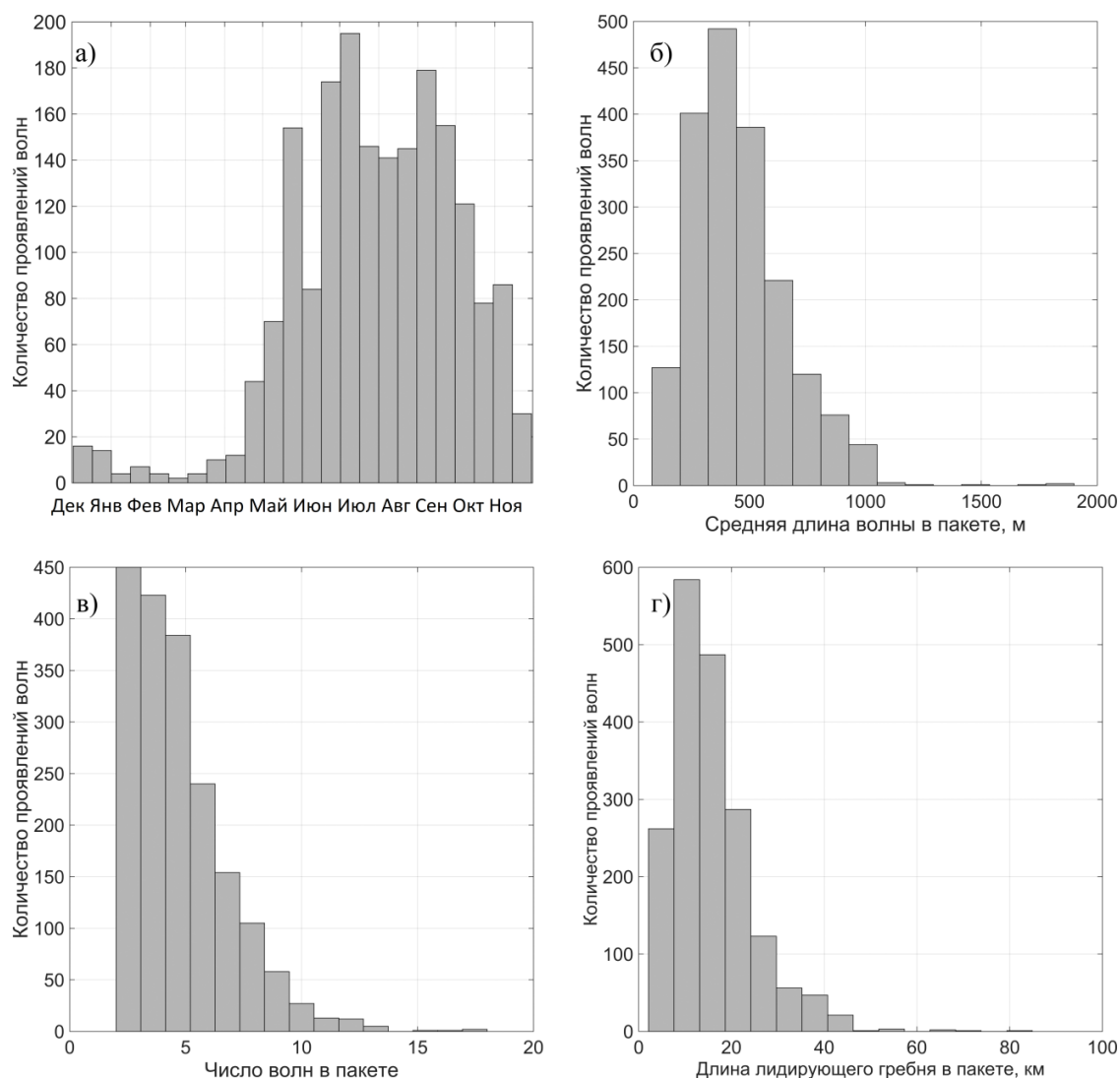


Рисунок 31. Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ, зарегистрированных за весь период: а) дат регистрации проявлений КВВ; б) средней длины волны; в) числа волн в пакете; г) длины лидирующего гребня

Для выявления положения очагов генерации КВВ построена карты с частотой встречаемости поверхностных проявлений волн за весь изучаемый период (рис 32). Так, выявлены основные очаги генерации для всего года, которые расположены у островов Кунашир и Зеленый, в районе острова Онекотан, у бухты Вестник и мыса Шипунский и в районе Кроноцкого полуострова и Камчатского полуострова.

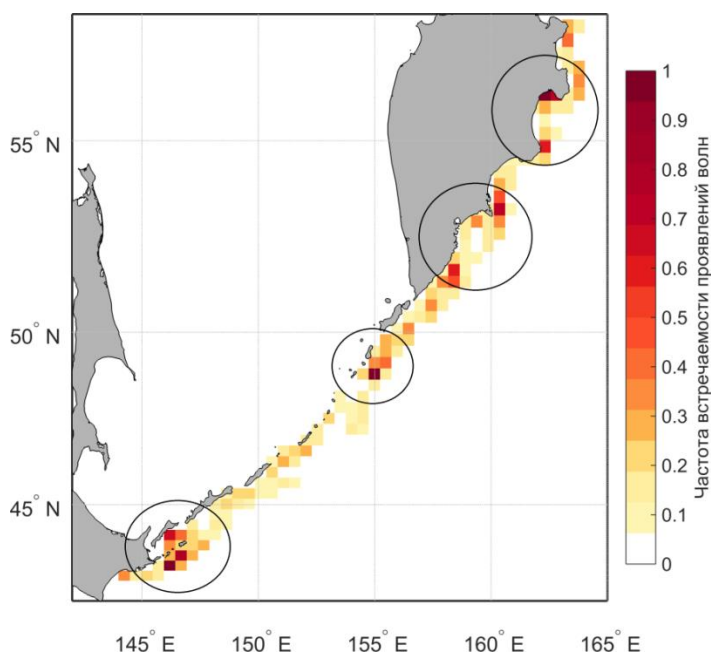


Рисунок 32. Частота встречаемости поверхностных проявлений КВВ за весь период

Были построены карты с длиной лидирующего гребня и длиной волны (рис.33 и 34). Видно, что максимальные значения этих характеристик приурочены к очагам генерации. Поверхностные проявления КВВ регистрируются на акватории изучаемого региона повсеместно. Однако, рассмотрев рисунки 16 г), 20 г), 24 г) и 28 г) можно сделать вывод, что пространственное положение и количество проявлений КВВ непостоянно и очаги генерации перемещаются в пространстве в зависимости от сезона. В летний период очаги генерации лучше всего выделяются и являются самыми интенсивными, с частотой встречаемости поверхностных проявлений около 1.2 (область у островов Кунашир и Зеленый, над хребтом Витязь в районе острова Онекотан, вблизи мыса Шипунский и в районе Камчатского полуострова). Осенью можно выделить практически такие же очаги генерации, что и летом, но уже с меньшей интенсивностью. Весной частота встречаемости практически не превышает 1, и в отличие от лета и осени в районе острова Онекотан уже нельзя выделить очаг генерации. Зимой выделяется всего два очага генерации (возле мыса Шипунский в Кроноцком заливе и у Камчатского полуострова), так как очень мало зарегистрированных волн и очаги генерации плохо выражены.

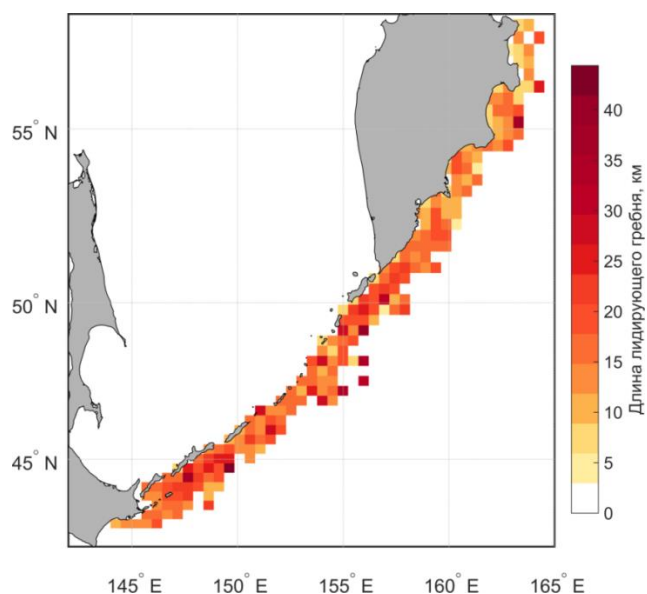


Рисунок 33. Длина лидирующего гребня за весь период

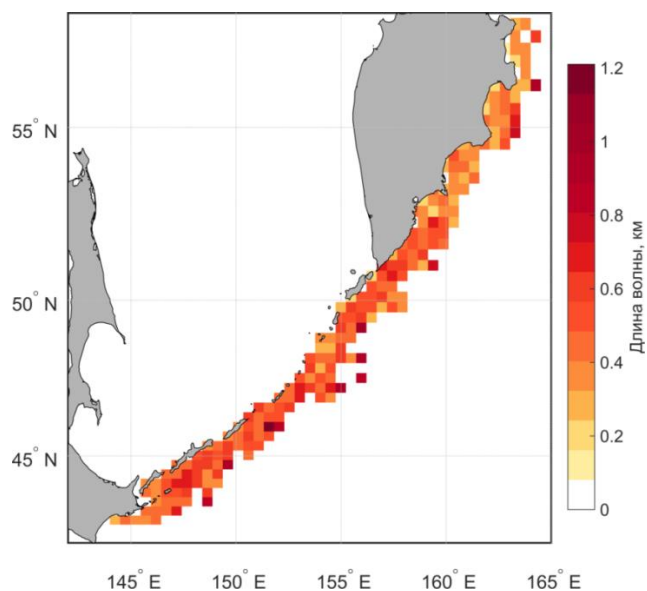


Рисунок 34. Длина волны за весь период

Таблица 22 показывает количество КВВ, зарегистрированное в трех районах исследуемой акватории таких как, Южные Курилы, Северные Курилы и район вблизи полуострова Камчатка. Больше всего волн обнаружено возле Камчатки - 739, на юге Курил выделено 713 поверхностных проявлений КВВ и на севере Курил - 423 КВВ. Значения всех основных характеристик проявления КВВ указаны в таблице 23. На юге Курил волновые пакеты содержали от 2 до 16 волн, в среднем - 5 волн. Длины волн варьировались в пределах от 110 до 1900 метров, при среднем значении 512 метров. Длина лидирующего гребня составляла от 2 до 85 км, а среднее значение составляло 17 км. На севере Курил были выявлены КВВ, которые состояли от 3 до 18 волн, при среднем значении 5 волн. Длина волны в этом районе изменялась от 140 до 1900 метров, при среднем - 592 метра. Длина лидирующего

гребня была от 3 до 53 км, а средняя величина составляла 22 км. В районе полуострова Камчатка обнаруживались пакеты, содержащие в себе от 2 до 18 волн, а среднее - 5 волн. Длина волны была от 80 до 990 метров, среднее значение при этом составляло 444 метра. Длина лидирующего гребня возле Камчатки изменялась в пределах от 2 до 54 км, при среднем - 16 км.

Таблица 22 Количество зарегистрированных проявлений КВВ по районам за весь период

Район	Сезон				
	Лето	Осень	Весна	Зима	Всего
Южные Курилы	309	282	110	12	713
Северные Курилы	260	130	25	8	423
Камчатка	355	237	120	27	739

Таблица 23 Характеристики по районам за весь период

Район	Южные Курилы	Северные Курилы	Камчатка
Кол-во волн в пакете, шт	2 - 16	2 - 18	2 - 18
Среднее кол-во волн в пакете, шт	5	5	5
Длина волны, м	110 - 1900	140 - 1900	80 - 990
Средняя Длина волны, м	512	592	444
Длина лидирующего гребня, км	2 - 85	3 - 53	2 - 54
Средняя длина лидирующего гребня, км	17	22	16

Были рассмотрены направления распространения зарегистрированных за все время наблюдений пакетов поверхностных проявлений КВВ в трех областях таких как, Южные Курилы, Северные Курилы и вблизи полуострова Камчатка. Круговые гистограммы повторяемости направлений распространения волн показаны на рисунке 35. В целом за весь период направление зарегистрированных волн непостоянно. Для Южных Курил и полуострова Камчатка (рис.35 а и в) характерен большой разброс направлений с относительно одинаковым процентом повторяемости. Это может говорить о существовании большого количества источников или действия дополнительных непрививных механизмов генерации внутреннего волнения (Сабинин, Серебряный, 2007). Но для Северных Курил (рис.35 б) характерны более узкие диапазоны направленности от 100° до 140° для юго - востока от 300° до 0° для северо-запада. Такие диапазоны могут свидетельствовать о том, что в данном районе преобладают периодически действующие механизмы генерации КВВ. К таким периодическим механизмам можно отнести приливы. В районе островов Курильской гряды относительно

фоновому уровню повышен коэффициент диапикнической диффузии и это может говорить о ключевой роли приливной динамики для генерации КВВ (Nakamura, Awaji, 2004).

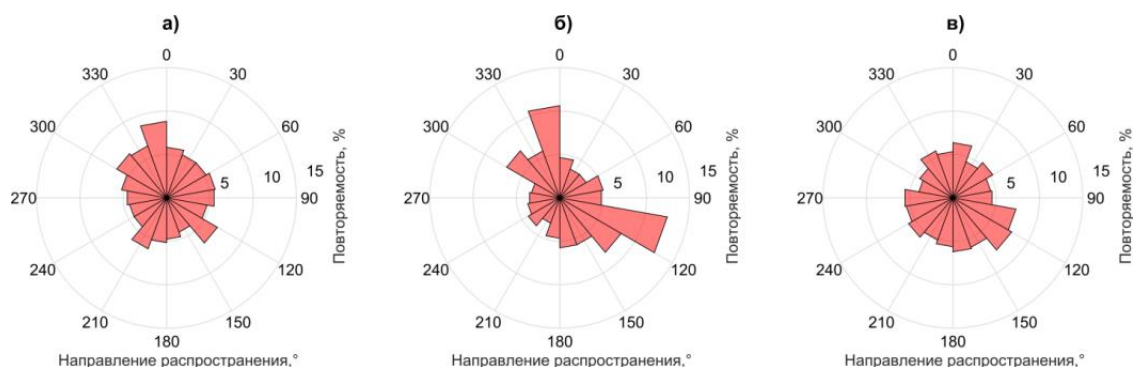


Рисунок 35. Круговые гистограммы повторяемости направления распространения пакетов проявлений КВВ за весь период (на круговую ось нанесены направления распространения пакетов в градусах, на радиусную ось – повторяемость направлений распространения в % от общего числа случаев): а) для Южных Курил; б) для Северных Курил; в) для полуострова Камчатка

За весь изучаемый период было зарегистрировано 1875 поверхностных проявлений КВВ. Наблюдались преимущественно пакеты, содержащие в себе волн с длиной волны около 501 метра и длиной лидирующего гребня 17 км. Максимальное число КВВ было обнаружено за летний период - 924, за осенний период выделено 649 поверхностных проявлений внутреннего волнения, за весенний - 255 и за зимний период зарегистрировано 47 пакетов КВВ. Анализ КВВ за весь год позволил выявить основные очаги генерации, которые расположены у острова Кунашир и у острова Зеленый, в районе острова Онекотан, в области бухты Вестник и мыса Шипунский и в районе Кроноцкого полуострова и Камчатского полуострова. Отчетливее всего эти очаги генерации можно наблюдать летом, осенью картина практически такая же, но с меньшей интенсивностью, весной очаги генерации уже меньше выражены, а зимой совсем трудно распознаются.

3.6 Обсуждение возможных механизмов генерации КВВ

При подробном разборе РЛИ за летний период, так как там обнаружено больше всего проявлений внутреннего волнения на некоторых радиолокационных изображениях были обнаружены последовательные пакеты КВВ, которые приурочены к очагам генерации. На рисунке 36 показан пример таких пакетов.

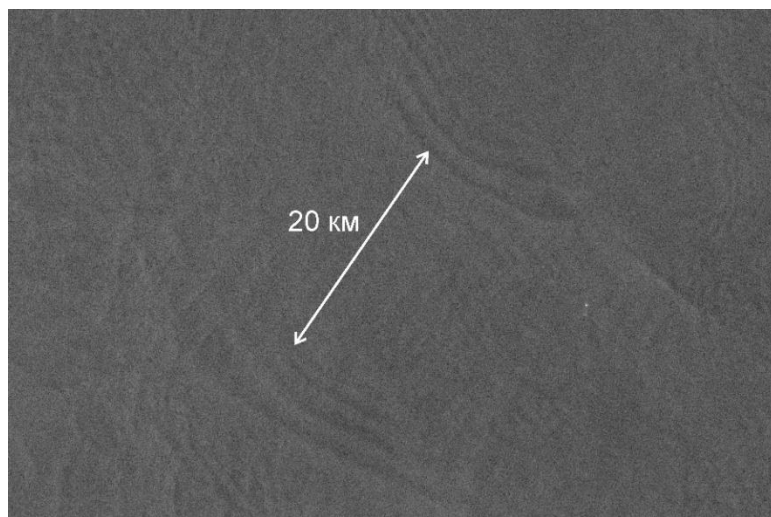


Рисунок 36. Пример проявлений последовательных пакетов КВВ, зарегистрированных на РЛИ Sentinel 1 от 01 июня 2019 года

Как упоминалось ранее, что генерация последовательных пакетов КВВ может быть связана с приливными процессами. Для проверки данного предположения была рассчитана фазовая скорость таких пакетов, как отношение расстояния между ними к периоду приливного цикла, как указано в работе (Дубина, Митник, 2007). Далее она была сопоставлена со значениями фазовой скорости ВГВ волн за летний период, которые были выбраны из программы IGWResearch (Тюгин и др., 2020). Фазовая скорость ВВ в этой программе рассчитывается, используя данные климатического атласа WorldOceanAtlas 2018 года. Результаты сопоставленных фазовых скоростей ВВ, полученных разными методами, представлены в таблице 24.

Учитывая величину приливного периода и расстояние между последовательными пакетами, фазовая скорость последовательных проявлений варьируется в пределах от 0,56 до 0,61 м/с, что довольно хорошо согласуется с данными, полученными из атласа фазовой скорости внутренних гравитационных волн за летний период, которые рассчитаны по климатическим данным. Это говорит о том, что, действительно, поверхностные проявления ВВ часто генерируются в данных районах под действием приливной динамики.

Таблица 24 Сопоставление фазовой скорости ВВ в очагах генерации по данным измерений на РЛИ и по данным (Тюгин и др., 2020)

Очаг генерации	Расстояние между пакетами, км	Приливной период	Фазовая скорость, м/с	
			по РЛИ	по данным
о. Зеленый	47,98	суточный	0,56	0,54
Хребет Витязь	52,74	суточный	0,61	0,65
Камчатский залив	26,49	полусуточный	0,61	0,62

Одним из популярных критериев генерации бароклинного прилива является tidalbodyforce (Baines, 1982). Это критерий построен на учете вынуждающего члена линейных двумерных (в вертикальной плоскости) уравнений движения, который представляет собой воздействие внутренних (бароклиных) приливов через баротропное течение с учетом неровностей рельефа дна. Согласно (Pichon, 2013) критерий tidalbodyforce, может быть выражен как:

$$F = -\frac{2\pi \cdot z \cdot N^2(z)}{\sigma \cdot H^2} \left[Q_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + Q_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right]$$

где Q (Q_x, Q_y) – амплитуда баротропного приливного потока,

sigma – приливная частота

H – локальная глубина

z – вертикальная координата, направленная

N² – квадрат частоты плавучести на определенной глубине

Стоит отметить, что данные критерии были получены из линейной теории, и формально могут быть применены только для выделения потенциальных мест генерации длинных внутренних приливных волн. Однако в работах (Azevedo, 2006; Pichon, 2013) авторы использовали интегрированную по глубине tidalbodyforce для определения потенциальных мест генерации и смогли объяснить генерацию больших амплитуд внутренних приливов и внутренних уединенных волн как исходящую из области, где body максимально. Исходными данными для расчетов послужили: оценки скоростей приливных течений из модели (Tide Model Driver (TMD): version 2.5: [Электронный ресурс], 2021), частота плавучести оценивалась по данным температуры и солености из массива, разработанного службой мониторинга морской среды «Коперник» (GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS :

[Электронный ресурс], 2021), глубина бралась из массива (GEBCO:[Электронный ресурс], 2021). Оценка критерия Bodyforce выполнялась по осреднённым за месяц данным. Подготовка массивов и расчет выполнялся сотрудниками лаборатории геофизических пограничных слоев СПбФ ИО РАН при участии автора.

Расчеты Bodyforce выполнялись для августа 2019 года (как месяц, в котором проявления КВВ на поверхности были наиболее частыми) для суточного прилива K1 (рис.37 а) и полусуточного прилива M2 (рис.37 б). Они сопоставлялись с картой частоты встречаемости поверхностных проявлений КВВ, на которой представлены очаги генерации КВВ (рис.16 в).

Отметим совпадение районов максимальной встречаемости. Из этого следует, что в районе острова Кунашир и острова Зеленый доминирует генерация под влиянием суточного прилива K1. Около острова Онекотан на генерацию внутреннего волнения может влиять как суточный K1, так и полусуточный M2 приливы. Возле Камчатского полуострова преобладает не сильно выраженная генерация под влиянием суточного лунного прилива K1. Полученные результаты показывают наличие связи КВВ с приливными процессами, но требуют дальнейшего рассмотрения путем анализа особенностей распространения КВВ в каждом из выявленных по критерию районов. Данная работа стоит в планах автора и его коллег.

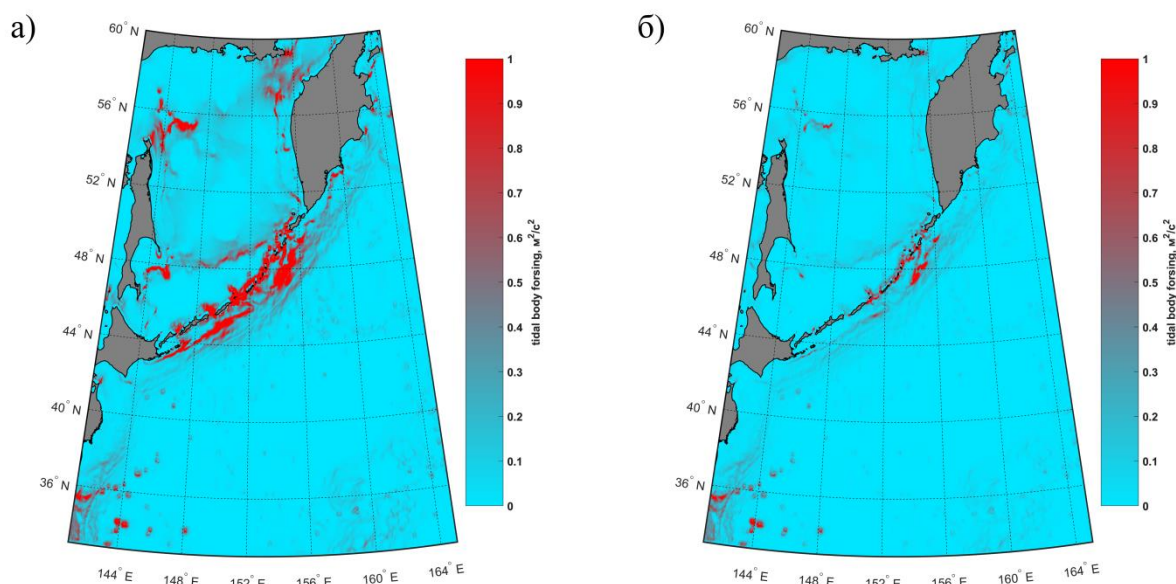


Рисунок 37. Bodyforce а) K1- суточный прилив; б) M2- полусуточный прилив

Другой причиной различия в проявлениях КВВ на поверхности может служить глубина залегания пикноклина или толщины верхнего квазиоднородного слоя. На рисунке 40 показана

зависимость поверхностных проявлений КВВ от глубины перемешанного (ГПС) слоя за весь изучаемый период (Глубина перемешанного слоя: [Электронный ресурс], 2021) Видно, что в холодное время с ноября по апрель глубина перемешанного слоя в несколько раз превышает глубину перемешанного слоя в теплое время года. С мая по октябрь ГПС составляет около 10 метров и, соответственно, в этот период наблюдается максимальное количество волн, что наглядно видно из рисунка 38.

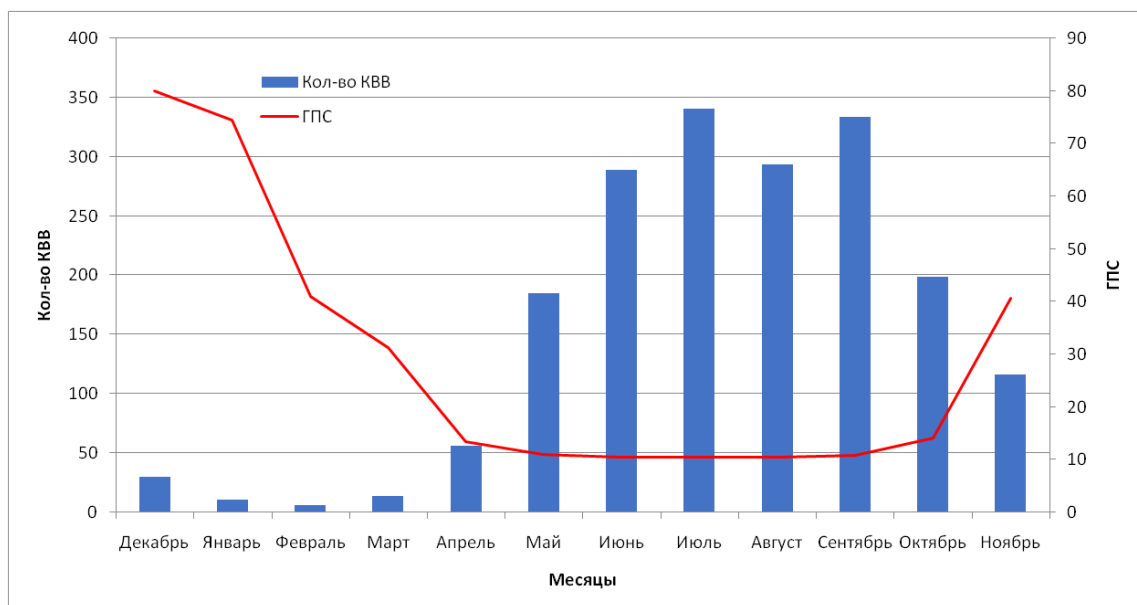


Рисунок 38. Зависимость количества КВВ от глубины перемешанного слоя

Область диссипации внутреннего прилива в районе островов Курильской гряды узкая (Дубина, Митник, 2007), и многие из зарегистрированных проявлений КВВ нельзя приурочить к этой области. Отметим, что исследуемый регион находится в зоне, где действуют ярко-выраженные поверхностные течения: преимущественно Камчатское и частично Ойясио (Жабин, Андреев, 2014). Это обуславливает довольно высокую вихревую активность в этом регионе. Проанализировав оптические изображения прибора Landsat – 8 за летний период, было обнаружено, что вблизи очагов генерации КВВ также часто регистрировались и вихревые структуры разного масштаба. Пример вихревой структуры, зарегистрированный на оптическом изображении, который совмещен с проявлениями короткопериодных внутренних волн, полученными из данных анализа РЛИ приведен на рисунке 39.

На рисунке 39 продемонстрирована циклоническая вихревая структура, у которой максимальный размер около 26 км. На расстоянии около 5 км друг от друга в районе этой структуры регистрировались многочисленные проявления КВВ, которые распространялись в одинаковом направлении. Такое небольшое расстояние между пакетами КВВ может говорить

о механизме генерации, который действует с частотой в несколько раз меньше, чем у приливной. Источником генерации выделенных проявлений может служить взаимодействие течений в районе вихревой структуры с пикноклином (Романенков и др., 2016; Лаврова и др., 2011). Похожие примеры влияния вихревой динамики на генерацию КВВ наблюдались и у побережья Камчатского полуострова (Свергун, Зимин, 2020).

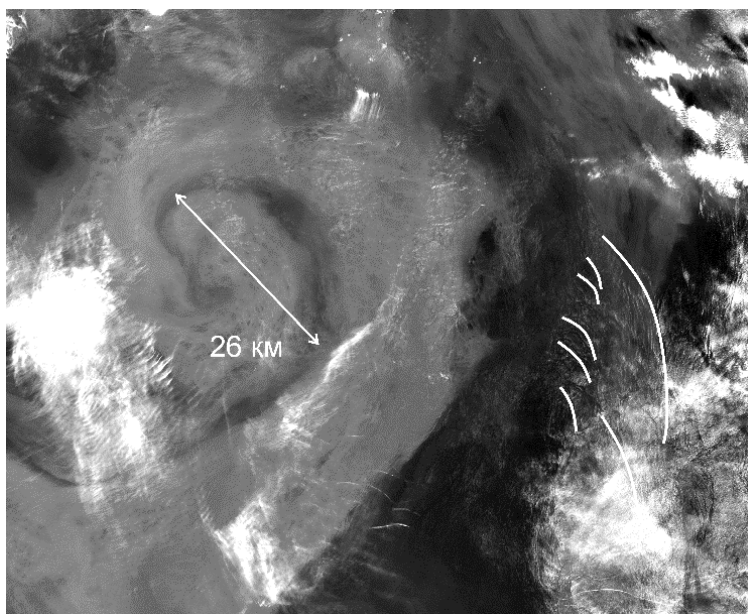


Рисунок 39. Пример регистрации вихревой структуры на оптическом изображении зеленого канала спутника Landsat-8 от 29 июля 2019 года (белыми кривыми показаны лидирующие гребни проявлений волн)

Так, помимо приливного механизма генерации в исследуемом районе может активно действовать механизм, где генерация короткопериодных внутренних волн вызывается относительно крупными меандрами течений, курило - Камчатского и Ойясио.

Заключение

В ходе работы была исследована внутригодовая пространственно - временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн вблизи Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов. Значения таких характеристик как количество гребней в пакете, длина волны, длина лидирующего гребня и направление распространения были получены по результатам обработки спутниковых изображений радиолокатора Sentinel - 1 начиная с декабря 2018 года по ноябрь 2019 года.

В результате было обработано 827 радиолокационных изображений и выявлено 1875 проявлений короткопериодных внутренних волн. Из них максимальное число зарегистрированных КВВ было выявлено в летний период - 924, а минимальное количество зафиксировано в зимний период и составило 47 КВВ.

Были построены карты пространственного положения лидирующих гребней КВВ и тем самым показано широкое распространение КВВ на акватории Курило - Камчатского региона. Основные очаги генерации КВВ, расположены у островов Кунашир и Зеленый, в районе острова Онекотан, у бухты Вестник и мыса Шипунский и в районе Кроноцкого полуострова и Камчатского полуострова.

Получены детальные характеристики внутреннего волнения на всей исследуемой акватории. Пакеты короткопериодных внутренних волн за весь период в среднем содержали 5 волн, длина волны составляла около 501 метра, а длина лидирующего гребня - 17 км. Летом преимущественно выделялись 5 - ти волновые пакеты с длиной волны в среднем 441 метр, а длиной лидирующего гребня - 15 км. Осенью выявлены КВВ, содержащие около 5 волн, с длиной волны равной 477 метров и длиной лидирующего гребня в 17 км. Весной пакеты имели в себе 5 волн, длину волны 509 метров, а длину лидирующего гребня 17 км. Зимой на снимках были обнаружены проявления, которые состояли из 6 волн и имели длину волны равную 575 метров, а длину лидирующего гребня 20 км.

Также была оценена изменчивость характеристик в отдельных районах, таких как Южные Курилы, Северные Курилы и область вблизи полуострова Камчатка. На юге Курил волновые пакеты содержали около 5 волн, длины волн составляли среднее значение 512 метров, а длина лидирующего гребня - 17 км. На севере Курил были выявлены КВВ, которые состояли из 5 волн. Средняя длина волны в этом районе была 592 метра. Средняя величина длины лидирующего гребня составляла 22 км. В районе полуострова Камчатка обнаруживались пакеты, содержащие в среднем 5 волн, с длиной волны около 444 метра, а длина лидирующего гребня в среднем - 16 км. Были рассмотрены направления

распространения зарегистрированных за все время наблюдений пакетов поверхностных проявлений КВВ в этих трех областях. Направление можно оценить как непостоянное в течении всего периода. Для Южных Курил и полуострова Камчатка характерен большой разброс направлений, а для Северных Курил характерны более узкие диапазоны направленности от 100° до 140° для юго - востока и от 300° до 0° для северо-запада.

Была продемонстрирована связь короткопериодных внутренних волн приливом, а также с глубиной перемешанного слоя. Выявлено, что КВВ могут генерироваться как приливной динамикой, так и относительно крупными меандрами течений.

Продолжение данной работы связано с подробным изучением механизмов генерации КВВ в локальных районах рассматриваемой акватории.

Список литературы

1. Басович А. Я., Баханов В. В., Таланов В. И. (1982) Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность / Ред. Е. Н. Пелиновский. Горький: ИПФ, 1982. С. 8–30.
2. Баханов В. В., Таланов В. И. (1999) Трансформация нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сб. тр. / Ред. В. И. Таланов, Е. Н. Пелиновский. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 1. С. 81–106.
3. Бобков А.А. О внутрисезонной изменчивости течения Соя в районе южных Курильских островов // Вестн. ЛГУ. Сер. 7. 1990. Вып. 2.
4. Бобков А.А. Течение Соя и его ветви // Изв. Всесоюз. географ. о-ва. 1989. Т. 121. № 6. С. 531-535.
5. Бобков А.А., Печуткин Е.М., Топоров С.С. Анализ водных масс у Охотоморского побережья южных Курильских островов // Вестн. ЛГУ. Сер. 7. 1991. № 1. С. 121-127.
6. Бобков Л.А., Самко Е.В. Особенности гидрологической структуры вод в зоне воздействия течения Соя // Вестн. ЛГУ. Сер. 7. 1989. Вып. 1. № 7. С. 107-102.
7. Богданов К.Т., Мороз В.В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 2000. 152 с.
8. Богданов К.Т. Приливы Мирового океана. М.: Наука, 1975, 116 с.
9. Богданов К.Т. Причины образования туманов в районе Курильских и Алеутских островов // Морской сборник. 1972. № 3.
10. Богданов К.Т., Горбачев В.В., Мороз В.В. Атлас приливов Берингова, Охотского и Японского морей. Дальгеодезия, 1991.
11. Богданов К.Т., Мороз В.В. Воды Курило - Камчатского течения и течения Ойясио. Владивосток: Дальнаука, 2004. 140 с
12. Богданов К.Т., Мороз В.В. Гидрологические условия зоны Курильских проливов в летний сезон // Океанология. 1998. Т. 38. № 6. С. 813-821.
13. Бурков В.А. К гидрологии Командоро – Камчатского района Тихого океана в весеннее время // Тр. ИОРАН. 1958. Т. XXXVII. С. 12 - 21
14. Геолого-геофизический атлас Курильской островной системы. – Л.: ВСЕГЕИ. 1987. -36 с.
15. Гидрология Тихого океана / Под.ред. А.Д. Добровольского. М.: Наука, 1968. 254 с.
16. Гладышев С. В. Термохалинные фронты в районе Курильских островов // Океанология. 1994. Т.34, № 4. С. 504-512.

17. Глубина перемешанного слоя: [Электронный ресурс] // resources.marine.copernicus.eu
URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 (дата обращения 26.04.2021)
18. Гнибиденко Г. С., Быкова Т. Г., Веселов О. В. и др. Тектоника Курило - Камчатского глубоководного желоба / ; Отв. ред. П. М. Сычев. - М.: Наука, 1980.
19. Горшков К. А., Долина И. С., Соустова И. А. Троицкая Ю. И. (2003) Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 661–672.
20. Давыдов И.В. Некоторые черты атмосферной циркуляции над северо-западной частью Тихого океана в связи с режимом вод на Камчатском шельфе // Изв. ТИНРО. 1975. Т. 97. С. 157-171.
21. Дубина В.А., Митник Л.М. Внутренние волны в Японском море: пространственно-временное распределение и характеристики по данным спутникового дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 37-46
22. Е. П. Леликов, Т. А. Емельянова Геология и вулканизм подводного хребта Витязя на Тихоокеанском склоне Курильской островной дуги //Океанология, 2011, том 51, № 2, с. 329-343
23. Елифанова А. С., Рыбин А. В., Моисеенко Т. Е., Куркина О. Е., Куркин А. А., Тюгин Д. Ю. База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане // МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ.2019. Т 35 № 4
24. Ермаков С. А., Пелиновский Е. Н., Талипова Т. Г. (1980) О влиянии пленок поверхностно-активных веществ на изменения спектра ветрового волнения под действием внутренних волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 11. С. 1068–1076.
25. Жабин И.А., Андреев А.Г. Взаимодействие мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей в охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2014. № 4. С. 75-78.
26. Жуков Л.А. Основы гидрологического режима Курильского района Тихого океана // Тр. Курило - Сахалинской морской комплексной экспедиции ЗИН ТИНРО, 1947-1949 гг. М., 1954. С. 304-309.
27. Иващенко Э.А., Горячева Т.А., Кутько В.П., Стасенко В.Н. К выделению сроков наступления гидрологических сезонов в северной части Тихого океана // Тр. ВНИДМИ-МЦД. 1981. Вып. 90. С. 71-75
28. Корт В.Г. О крупномасштабном взаимодействии океана и атмосферы (на примере северной части Тихого океана) // Океанология. 1970. Вып. 2. С. 222-240.

29. Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положение кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН. 1964. Вып. 71. С. 5-82.
30. Лаврова О. Ю. Проявление внутренних волн на спутниковых изображениях северо-восточной части Черного моря в июле 2017 г.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №1. С. 309–315
31. Лаврова О.Ю. и др. Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436, № 3. С.407-411.
32. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 С.
33. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий М.: ИКИ РАН, 2016. 336 С.
34. Михайлов О.В. Некоторые новые данные о рельефе дна Курило - Камчатского желоба // Труды ИО АН СССР. -1970.-Т.86.-С.72-76.
35. Мороз В.В. Изменчивость гидрологических условий района Курильских островов в теплое полугодие в связи с особенностями атмосферной циркуляции //Метеорология и гидрология. 1999. № 12. С. 88-93.
36. Мороз В.В., Новожилов В.Н. О температурных экстремумах промежуточных слоев в северо-западной части Тихого океана // Сб. Океанологические исследования в Тихом океане, Владивосток, 1985.
37. Морошкин К.В. Водные массы северо-западной части Тихого океана в районе Курило - Камчатской впадины // Тр. ИОАН. 1955. Т. XII.
38. Охотское море. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. С-Пб.: Гидрометеиздат, 1998. 342 с.
39. Побережье Камчатки: два района [Электронный ресурс] // kamchatkaland.ru. URL: <https://kamchatkaland.ru/note/poberezhe-kamchatki> (дата обращения 23.03.2021)
40. Родионов А.А. и др. Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т.5, №2. С.89-108.
41. Романенков Д. А. и др. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т.9, № 1. С. 59-72.

42. Сабинин К.Д. Горячие точки в поле внутренних волн в океане / Сабинин К.Д. Серебряный А.Н. // Акустический журнал. 2007. Т53, №3, С.410-436.
43. Самко Е.В., Фукс В.Р. Фронтальные зоны в истоках течения Ойясио // Физическая океанология и проблемы биологической продуктивности. Л., 1992. С. 22-41.
44. Сваричевский А.С., Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Новые данные по геоморфологии южной части Курильского глубоководного желоба // Структура осадочных отложений Курило - Камчатского желоба. -Южно-Сахалинск: ДВНЦ АН СССР, 1979. – С.37-50.
45. Свергун Е. И., Зимин А. В. Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе – сентябре 2018 года // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С.300–312.
46. Сметанин Д.А. Гидрохимия района Курило -Камчатской глубоководной впадины // Тр. ИОАН. 1959. № 33. С. 43-86.
47. Советский Энциклопедический Словарь. Изд-е 4-е, М 1987
48. Тюгин Д.Ю. и др. Динамические эффекты в придонном слое, индуцированные аномальными внутренними волнами // Экологические системы и приборы. 2014. № 1. С. 20-28.
49. Тюгин Д.Ю. и др. Обновлённый программный комплекс для моделирования внутренних волн в Мировом океане с поддержкой облачных вычислений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 1. С. 24-34.
50. Alpers W. (1985) Theory of radar imaging of internal waves // Nature. 1985. N. 314. P. 245–247
51. Baines, P.G., 1982. On internal tide generation models. Deep-Sea Research 29, 307–338.
52. Cavailery D.J., Parkinson C.L. On the relationship between atmospheric circulation and the fluctuations in the sea ice extents of the Bering and Okhotsk Seas iJ.Geophys.Res. 1987. V. 92. P. 7141-7162.
53. Fraser N. Surfing an oil rig. EnergyRev. 1999, N4.
54. Gawarkiewicz G., Chapman D. The role of stratification in the formation and maintenance of shelf-break fronts // J. Phys. Oceanogr. Vol. 22, N 7. 1992. P. 753-772.
55. GEBCO: [Электронный ресурс] // URL: <https://www.gebco.net> (дата обращения 10.05.2021)
56. Gerkema, T., Lam, F.-P.A., Maas, L.R.M., 2004. Internal tides in the Bay of Biscay: conversion rates and seasonal effects. Deep-SeaResearch II 51, 2995–3008
57. GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS : [Электронный ресурс] // marine.copernicus.eu URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (дата обращения 10.05.2021)

58. J. C. Azevedo, A. L. Da-silva, and. New, On the generation and propagation of internal solitary waves in the southern Bay of Biscay, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, vol.53, issue.6, pp.927-941, 2006.
59. Jackson C. R., Apel J., An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties, Second Edition, 2004.
60. Jackson C. R., Apel J., An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties, Second Edition, 2004.
61. Nakamura T., Awaji T. Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment. J. Geophys. Res. 2004. V. 109.
62. Pao, H. P. and Q. He, 2002: Generation and Transformation of Intense Internal Waves on Shelves, Abstracts for COAA Scientific Workshop at the University of Maryland, Collage Park, July 13, 2002
63. Pichon, A., Y. Morel, R. Baraille, and L. S. Quaresma (2013), Internal tide interactions in the Bay of Biscay: Observations and modeling, J. Mar. Sys., 109– 110, S26-S44
64. Sentinel - 1: [Электронный ресурс] // www.turbosquid.com. URL:<https://www.turbosquid.com/3d-models/3d-sentinel-1-earth-observation/759136> (дата обращения 24.03.2021)
65. Shiniji Fukutaro. Relationship between oceanographic conditions and atmospheric circulation patterns in the north-western North Pacific // Biol. Oceanogr. North.Pacif. Ocean.Tokyo, 1972. P. 63-71.
66. Talley L.D. At Okhotsk sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific // Deep-Sea Res. A., 1991. 38. Suppl. n. 2. P. 171-190.
67. Tide Model Driver (TMD): version 2.5: [Электронный ресурс] // www.mathworks.com URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/75599-tide-model-driver-tmd-version-2-5-toolbox-for-matlab#:~:text=TMD%202.5%20includes%20two%20components,for%20predictions%20of%20specific%20variables> (дата обращения 10.05.2021)
68. Uda M. Cyclic. correlated occurrence of worldwide anomalous oceanographic phenomena and fisheries conditions // J. Oceanograph. Soc. Japan.20" Anniversary vol. 1962. P. 368-376.